

504(075,8)  
П639

Ю.І. ПОСУДІН

# ФІЗИКА І БІОФІЗИКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА



ЮІ.ПОСУДІН

*Моєму синові Сергію —  
з любов'ю, повагою і вдячністю  
Автор*



# ФІЗИКА І БІОФІЗИКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

КИЇВ  
•СВІТ•  
2000

1 серпня 1946 р. з ініціативи американського сенатора Дж. Уільяма Фулбрайта було запропоновано програму підтримки міжнародного обміну вченими. З моменту заснування ця програма дала можливість більш як 24000 іноземним вченим викладати свої дисципліни або провадити наукові дослідження в американських університетах; певна кількість американських вчених виїхала для цього за кордон.

В основу підручника «Фізика і біофізика навколишнього середовища» покладено лекції, які автор читав 1996 р. у Сполучених Штатах як Фулбрайтівський стипендіат.

Автор висловлює ширю подяку адміністрації Програми академічних обмінів імені Фулбрайта за сприяння виданню цього підручника, призначеного для тих, хто не байдужий до сучасних проблем екології.



П  $\frac{1605070000 - 1}{2000}$  Без огол.

© Ю.І. Посудін, 2000

ISBN 996-7683-08-7

## ПЕРЕДМОВА

Розвиток екологічної науки й екологічної інженерії характеризується певною історією і мультидисциплінарністю. Роботи, присвячені проблемам навколишнього середовища, розглядаються з різних точок зору — демографії (Meadows D.H. et al., 1972), енергетики (Fowler J.M., 1979), техніки (Henry J.G., Heinke G.W., 1996), фізики (Boeker E. and Grondelle R., 1994), спектроскопії (Посудін Ю.І., 1998), хімії (Environmental chemistry, 1982), тваринництва (Farm animals..., 1992), мікробіології (Slater J.M. and Bull A.T., 1982), медицини (Browning E., 1969).

Але проблема екологічного моніторингу біосфери висвітлена в науковій літературі фрагментарно, а інколи, й еkleктично. Студентам природничих та інженерних напрямів необхідний вступний міждисциплінарний курс лекцій, який заповнив би прогалину в наших знаннях щодо розуміння і контролю складних взаємодій між урбанізованим та індустріалізованим людським суспільством і природою.

Студентам усіх дисциплін потрібен такий підручник, який би кількісно оцінював екологічні проблеми: їх походження, основи їх наукового розуміння та контролю, методи розв'язання.

Причини екологічних проблем, таких як природні порушення екологічної рівноваги, зростання населеності, урбанізація та індустріалізація, зростання обсягів споживання енергії повинні бути проаналізованими на основі нових методологічних підходів та використання сучасних технологій.

Основу розуміння екологічних проблем становить огляд сучасного стану техніки екологічного моніто-

рингу щодо його застосування для контролю атмосфери, гідросфери, літосфери, фауни і флори.

Вивчення екологічних проблем дасть можливість мінімізувати вихід відходів через впровадження досконалої техніки й методології, споживання екологічно чистої продукції, рекультивацію ґрунтів, розробку реноваційних систем та програм повторних циклів.

*Основною метою* підручника є ознайомлення студентів природничих (екологічних, біологічних, сільськогосподарських, медичних) та інженерних спеціальностей з фізичними механізмами й процесами, що становлять основу життєдіяльності людини, тваринного і рослинного світу під впливом навколишнього середовища, а також принципів основних фізичних методів та приладів, що застосовуються для контролю забруднення навколишнього середовища з метою розробки заходів з його охорони. Видання підручника «Фізика і біофізика навколишнього середовища» можна розглядати як складову частину глобальної реформи екологічної освіти.

*Конкретними завданнями* підручника є:

1) опис основних характеристик біосфери та її основних компонентів — атмосфери, гідросфери й літосфери;

2) розгляд основних причин та масштабів екологічних порушень, викликаних процесами урбанізації та індустріалізації людського суспільства;

3) оцінка абіотичних і біотичних факторів середовища, зокрема тих, що спричиняють стреси в живих організмах;

4) ознайомлення з фізичними величинами та одиницями, що характеризують ці фактори;

5) вивчення здатності живих організмів сприймати зовнішні фактори та реагувати на забруднення навколишнього середовища;

6) ознайомлення з основними методами та принципом дії приладів для вимірювання параметрів навколишнього середовища, в тому числі з засобами дистанційного зондування компонентів біосфери;

7) обговорення запобігання забрудненню навколишнього середовища завдяки мінімізації екологічних відходів, застосуванню сучасних технологій і стимуляції людської активності.

Намір видати підручника такого напрямку має безпосередній зв'язок із здоров'ям людини, оскільки визначається науковим розумінням того, що забруднення навколишнього середовища провокує захворювання людства.



## Глава 1. БУДОВА І ФУНКЦІЇ БІОСФЕРИ

### БІОСФЕРА ТА ЇЇ ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ

#### Основні визначення

*Біосфера* - оболонка Землі, що включає нижню частину атмосфери, гідросферу і верхні шари літосфери, склад, структура й енергетика яких значною мірою зумовлені минулою та сучасною життєдіяльністю живих організмів.

Біосфера може бути розділена на три середовища, таких як:

*атмосфера* - шар повітря, що становить периферійну оболонку планети й оточує два інших середовища;

*гідросфера* — водна оболонка Землі, що містить Світовий океан, ріки, озера та підземні води;

*літосфера* — середовище, обмежене верхніми шарами земної поверхні, тобто — тверда поверхня материків.

У біосфері мешкають близько 10000 видів рослин, 3000 видів ссавців, 25000 видів птахів, ще більше риб, майже 1 млн комах. Грубо живі організми можна поділити на мікроорганізми, рослини і тварини.

Суспільство живих організмів утворює *біоценоз*, а специфічне фізико-хімічне оточення цих організмів називається *біотопом*. Сукупність біотопу з біоценозом називається *екосистемою*.

*Навколишнє природне середовище* - це сукупність природних і змінених діяльністю людини абіотичних та біотичних факторів, що безпосередньо або опосередковано впливають на людину.

*Абіотичні фактори середовища* — це компоненти та явища неживої, неорганічної природи, що впливають на живі організми. Їх можна поділити на:

*Фізичні (кліматичні) фактори*: тиск; рух повітря; вітер; вологість; атмосферні опади; температура; сонячне випромінювання; радіоактивні випромінювання.

*Гідрографічні фактори (фактори водного середовища)*: густина води; в'язкість; температура; теплоємність; світловий режим; прозорість.

*Едафічні (грунтові) фактори*: структура і склад ґрунтів; вміст води; вологість; кольор ґрунту.

*Хімічні фактори*: хімічний склад компонентів у біосфері; забруднення хімічної природи.

*Біотичні фактори середовища*: сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також на неживе середовище мешкання.

*Забруднення* — це несприятлива зміна навколишнього середовища, яка цілком або частково є результатом людської діяльності, що безпосередньо або опосередковано впливає на розподіл енергії та рівні радіації, фізико-хімічні властивості навколишнього середовища й умови існування живих істот. Ці зміни можуть впливати на людину безпосередньо або через сільськогосподарські ресурси, воду чи інші біологічні продукти та речовини.

Класифікувати основні типи забруднення та шкідливих впливів можна згідно з їх природою на *фізичні, хімічні та біологічні* (табл. 1.1).

#### 1.1. Класифікація основних типів забруднень

Забруднення		
Фізичні	Хімічні	Біологічні
1. Теплове	1. Аерозолі	1. Мікробіологічні отруєння (віруси, бактерії)
2. Шумове	2. Хімічні речовини та сполуки	2. Біомедичні відходи
3. Електромагнітне	3. Промислові відходи	3. Надмірна експансія живих організмів
4. Світлове	4. Пестициди	
5. Радіоактивне	5. Пластмаси	
6. Дефіцит чи надлишок води	6. Синтетичні поверхнево-активні речовини	

Забруднення — це біотичні та абіотичні фактори, які під час різкої зміни можуть викликати неспецифічну реакцію живого організму — *стреси*. Звичайно абіотичні та біотичні фактори зазнають певних коливань, та коли ці коливання перевищують норми, складаються *стресові ситуації* (рис. 1.1).

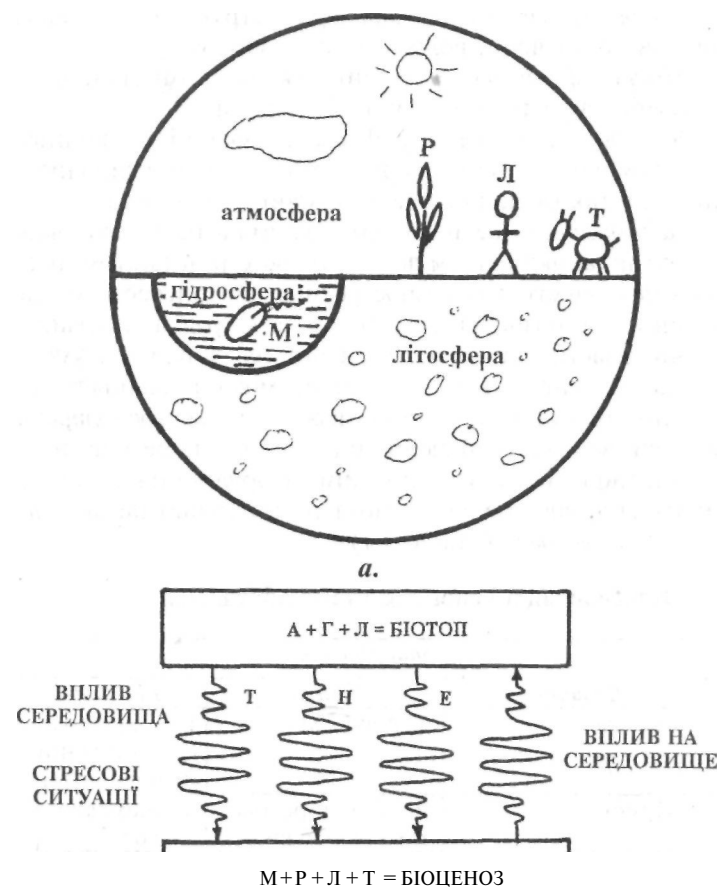


Рис. 1.1. а. Склад біосфери. Тут: Р — рослини; Л — людина; Т — тварини; М — мікроорганізми.

б. Зв'язок між абіотичними і біотичними факторами. Тут: А — атмосфера; Г — гідросфера; Л — літосфера; М — мікроорганізми; Р — рослини; Л — людина; Т — тварини

Система спостережень за станом природного середовища, що оточує людину, для розробки заходів з його охорони, раціонального використання природних ресурсів і попередження про критичні ситуації, шкідливі або небезпечні для здоров'я людей, за існуванням живих організмів та їхніх суспільств, природних об'єктів і комплексів, а також прогнозування масштабів неминучих змін називається *моніторингом*.

Наука, що вивчає умови існування живих організмів, та взаємозв'язки між організмами й навколишнім середовищем, називається *екологією*.

### Атмосфера

Атмосфера — один з найважливіших компонентів для життя біосфери. Вона пропускає та змінює сонячну енергію, яка управляє нашим кліматом; діє як захи-

### 1.2. Склад чистого сухого повітря, присутнього в нижній атмосфері

Гази	Формула	Концентрація (% об'єму)	Роль в навколишньому середовищі
<i>Активні гази</i>			
Азот	N <sub>2</sub>	78,09	Інертний як N <sub>2</sub> ; істотний для життя як N
Кисень	O <sub>2</sub>	20,95	Істотний для життя; хімічно активний
Водень	H <sub>2</sub>	5·10 <sup>-5</sup>	Важливий в хімії атмосфери
<i>Інертні гази</i>			
Аргон	Ar	0,93	Інертний
Неон	Ne	1,8·10 <sup>-3</sup>	Інертний
Гелій	He	5,2·10 <sup>-4</sup>	Інертний
Криптон	Kr	1,0·10 <sup>-4</sup>	Інертний
Ксенон	Xe	8,0·10 <sup>-6</sup>	Інертний
Радон	Rn	6,0·10 <sup>-18</sup>	Радіоактивний
<i>Змінні гази</i>			
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	3,6·10 <sup>-2</sup>	Істотний для життя; оптично активний
Озон	O <sub>3</sub>	1,0·10 <sup>-6</sup>	Токсичний; оптично і хімічно активний

сний екран від метеоритних атак і шкідливого ультрафіолетового випромінювання; підтримує польоти птахів і комах, поширення насіння та спор.

Атмосфера являє собою суміш газів, суспендованих твердих та рідких частинок. Грубо атмосферу можна уявити як сухе повітря разом з водяною парою. Склад сухого повітря наведено в табл. 1.2.

Атмосфера складається з декількох шарів, а саме: *тропосфери* (10+17 км); *стратосфери* (50+55 км); *мезосфери* (80 км) та *термосфери* (1000 км). Атмосфера регулює клімат на планеті, запобігаючи перегріванню та переохолодженню, підтримуючи середню температуру поверхні близько 14 °С.

*Водяна пара* є важливою компонентою атмосфери, її концентрація варіює від 210<sup>'''</sup>% у полярних широтах до 3% — на екваторі.

Загальна маса атмосфери становить 5,15-Ю<sup>18</sup> кг.

### Гідросфера

Склад гідросфери і розподіл водяних мас наведено у табл. 1.3.

#### 1.3. Склад гідросфери і розподіл водяних мас

Частина гідросфери	Об'єм води, 10 <sup>3</sup> км <sup>3</sup>	% загального об'єму
Світовий океан	1370000	94,0
Підземні води	60000	4,0
У тому числі зони активного водообміну	4000	0,3
Льодовики	24000	1,7
Озера	280	0,02
Грунтова волога	80	0,01
Пари атмосфери	14	0,001
Ріки	1,2	0,0001
Вся гідросфера	1454000	100,0

Вода є однією з найпоширеніших речовин. Вона входить до складу живих організмів, наявність в яких води зумовлює перебіг різноманітних реакцій. Вода

бере участь у кругообігу в природі, забезпечуючи життєдіяльність людини, тварин, рослин, мікроорганізмів.

### Літосфера

Товщина літосфери — 50+200 км; верхня частина літосфери, що містить живу речовину, входить до складу біосфери. Важливим компонентом літосфери є *грунт* — поверхневий шар земної кори, що утворюється і розвивається внаслідок взаємодії рослинності, тварин, мікроорганізмів, гірських порід і є самостійним природним утворенням. Важливою властивістю ґрунту є його родючість. Більшість живих організмів та їх відходи сприяють процесам, що відбуваються в ґрунті. Так, завдяки активності мікроорганізмів відходи перетворюються в основні компоненти ґрунту. Без цієї активності були б неможливими кругообіги вуглецю або азоту, важливих для життя на землі. Ґрунт — це тонкий шар земної поверхні. Товщина, фізичні та хімічні властивості його різні у кожній місцевості. У цілому ґрунт характеризується такими п'ятьма основними компонентами як: неорганічні мінеральні частинки, органічні залишки, вода, гази, біологічні системи.

## ПРИРОДА І МАСШТАБ ПРОБЛЕМ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### Природні порушення екологічної рівноваги

Ситуації або процеси в навколишньому середовищі, що призводять до економічних збитків або спричиняють небезпеку для здоров'я і життя мешканців земної кулі, становлять суть порушень екологічної рівноваги. Серед них слід розрізняти порушення природного і антропогенного характеру.

Причинами першого типу порушень є такі фактори як: кліматичні і метеорологічні (посухи, повені, циклони, торнадо), геологічні й геоморфічні (лавини, землетруси, ерозії, цунамі, виверження вулканів), флористичні (грибкові захворювання, сінна лихоманка) і фау-

ністичні (захворювання, що викликаються вірусами і бактеріями, різноманітні зараження від тварин).

Серед найбільш руйнівних природних лих ХХ століття можна виділити землетруси в Канто, Японія (1924 р., 150 тисяч жертв), Ашхабаді, СРСР (1949 р., ПО тис), Шензі, Китай (1956 р., 830 тис); виверження вулканів в Мартініці (1902 р., 28 тис.) і Колумбії (1985 р., 25 тис); повені в Китаї (1911 р., 100 тис, 1931 р., 140 тис); тропічний цикллон у Бангладеш (1970 р., 265 тис).

Звичайно, дуже важко запобігти впливу природних факторів, але врахувати, оцінити й проконтролювати їх з тим, щоб попередити населення конкретної місцевості, цілком можливо.

#### *Вплив збільшення чисельності населення на навколишнє середовище*

Згідно з даними наукових досліджень, чисельність населення земної кулі збільшується, причому не за лінійним, а за експоненціальним законом (рис. 1.2). Якщо ще

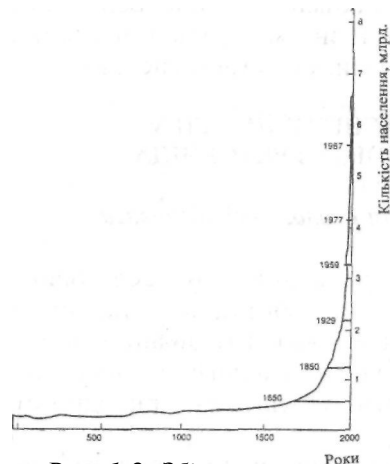


Рис. 1.2. Збільшення населення земної кулі за експоненціальним законом

проблем, перелік яких подано нижче:

*атмосфера* — збільшення вивільнення оксиду вуглецю, зменшення продукування кисню, руйнування

рослинних масивів унаслідок збільшення урбанізованих площ;

*гідросфера* — збільшення споживання водних ресурсів (поверхневих і підземних);

*літосфера* — збільшення переходу необроблених сільськогосподарських і невикористаних земель на користь міст.

#### *Вплив урбанізації на навколишнє середовище*

*Урбанізація* — це процес збільшення відношення кількості міського населення до кількості сільського. Перші міста з'явилися десь за 7000\*4000 років до нової ери. Та лише протягом останніх 200 років спостерігається масовий перехід сільського населення у міста в пошуках роботи. За сучасними уявленнями, місце проживання понад 200 тисяч мешканців вважається урбанізованим. Характерною рисою сучасної урбанізації є поява міст-гігантів із населенням понад 10 мільйонів чоловік. Серед них - Мехіко, чисельність населення якого 1990 р. становила 20,2 мільйона мешканців, а також Токіо, Сан-Паоло, Нью-Йорк, Шанхай, Лос-Анджелес, Калькутта, Буенос-Айрес, Бомбей, Сеул тощо. Тільки в період з 1950 по 2000 р. відносна кількість міст з населенням понад 5 млн мешканців має зрости з 2,2 до 23,5 %.

Процес урбанізації спричиняє значною мірою забруднення навколишнього середовища; він супроводжується низкою проблем, серед яких найзначнішою є збирання, обробка та утилізація твердих побутових відходів. До них належать: харчові відходи, папір, пластик, продукти текстильного виробництва, скло, металеві вироби, будівельні матеріали, залишки автомобілів тощо. Згідно з оцінками, загальна маса накопичених на території України промислових відходів на сьогодні перевищує 25 млрд тонн; на кожний квадратний метр її території припадає близько 40 тис. тонн відпрацьованих матеріалів. Слід зазначити, що воднораз із загальним забрудненням довкілля, наявні в муніципальних відходах органічні речовини можуть бути живильним середовищем для небезпечної мікрофлори,

яка викликає такі захворювання як дизентерія, гепатит, енцефаліт, гастрит тощо.

Підвищення рівня урбанізації призводить до таких екологічних наслідків:

*атмосфера* — зростання середньої температури на більшості урбанізованих площ;

*гідросфера* — інтенсивніше використання гідрологічних ресурсів унаслідок збільшенню чисельності населення;

*літосфера* — повні зміни ландшафту, зумовлені будівництвом.

Наявний в урбанізованому суспільстві транспорт також впливає на навколишнє середовище:

*атмосфера* — забруднення повітря внаслідок використання пального, утворення фотохімічного смогу, емісії свинцю двигунами;

*гідросфера* — дощі, забруднення поверхневих вод свинцем, зміни інфраструктури, спричинені дренажними роботами;

*літосфера* — руйнування структури і зовнішнього вигляду ландшафту.

Такі фактори урбанізації як психологічні ефекти впливу високої щільності населення, збільшення рівня шумів, забруднення повітря впливають на здоров'я людини.

#### *Вплив індустріалізації на навколишнє середовище*

Індустріалізація пов'язана з одного боку з підвищенням життєвого рівня людства, з іншого зумовлює розвиток таких шкідливих для довкілля галузей промисловості як нафтова, металургійна, харчова, вугледобувна, сільськогосподарська, целюозна тощо. Наведемо короткий перелік основних змін, зумовлених у біосфері внаслідок діяльності індустріальних підприємств:

*атмосфера* — парниковий ефект, озонова діра, кислотні дощі, експлуатація космосу, ядерні й хімічні відходи, важкі метали, використання стійких органічних речовин, таких як пестициди, побутові та промислові відходи, маленькі частинки;

*гідросфера* — водні відходи (мікроорганізми, тверді речовини, неорганічні сполуки, органічні речовини), муніципальні водні відходи, промислові водоскиди, евтрофікація водойм;

*літосфера* — закислення ґрунту, ґрунтові мікроорганізми, муніципальні тверді речовини, військові відходи, ядерні, біомедичні і хімічні відходи, сільськогосподарські забруднювачі — гній, пестициди, нітрати й нітрити, важкі метали, нафтопродукти, поверхнево-активні речовини.

Процес індустріалізації супроводжується появою індустріальних відходів, до яких належать різноманітні хімічні сполуки, відходи нафто- і вугледобувної промисловості, радіоактивні й біомедичні матеріали.

Сучасне сільськогосподарське виробництво, безумовно, впливає на навколишнє середовище. До забруднювачів тут належать рідкі та тверді відходи тваринництва й рослинництва, включаючи стоки із залишками пестицидів і добрив, нафта і нафтопродукти, гази двигунів, важкі метали, поверхнево-активні речовини, різні хімічні елементи й сполуки тощо. Всі ці забруднювачі, мігруючи, потрапляють до основних компонентів біосфери (атмосфери, гідросфери, літосфери), в рослинні і тваринні продукти і, врешті-решт — в організм людини.

Асортимент хімічних препаратів, використовуваних для інтенсифікації сільськогосподарського виробництва, зростає з кожним роком. Сюди входять гербіциди (знищення бур'янів), інсектициди (знищення комах), фунгіциди (вплив на гриби), дефоліанти (видалення листя), десиканти (висушування листя на пні), репеленти (відлякування живих організмів), аттрактанти (приваблювання та знищення шкідників). Усі ці пестициди можуть завдати за відсутності суворого контролю непоправної шкоди живому світу.

Надлишкове внесення мінеральних добрив також призводить до високих концентрацій поживних речовин у ґранті, що потрапляють у рослини. При цьому спостерігається погіршення якості рослинницької продукції внаслідок наявності нітратів чи нітритів, або аміачне отруєння рослин. Застосування азотміс-

них добрив небезпечно з точки зору можливих канцерогенних ефектів. Змивання сполук азоту і фосфору у водойми призводить до їхньої евтрофікації з усіма відповідними наслідками — посиленого розвитку фітопланктону, виникнення дефіциту кисню, загибелі водних організмів.

#### *Вплив розвитку енергетики на навколишнє середовище*

Зростання населеності зумовлює зростання обсягів споживання енергії, яку людство одержує за використання паливних запасів (вугілля, нафти, природного газу) й експлуатації атомних та гідроелектростанцій. У підсумку посилюється виділення в атмосферу двоокису вуглецю, збільшення вмісту якого відбувається за експоненціальним законом, а також таких сполук як двоокис азоту, сірководень, сірчаний газ, вуглеводень та інші. Всі вони спричиняють так званий «парниковий ефект», зумовлений підвищенням температури нижніх шарів атмосфери. З розвитком енергетики нагромаджуються обсяги радіоактивних відходів у вигляді відпрацьованого реакторного палива. Тільки в США сумарна кількість захоронених відходів перевищить у 2000 р. 1 тисячу мільярдів кюрі, а щорічний обсяг радіоактивних відходів досягне 25 мільйонів кюрі.

#### *Техногенні порушення екологічної рівноваги*

Істотно впливають на екологічну ситуацію техногенні порушення. До них слід віднести аварії на промислових підприємствах, атомних електростанціях, нафтопроводах, у нагромаджувальних системах. Обмеженість обсягу цього підручника не дає змоги перелічити всі аварії такого типу. Наведемо лише найзначніші з них: викиди нафти з танкерів «Ексон Валдіс» (1967 р.), «Сева-Мару» (1975 р.), «Амоко Кадіс» (1978 р.), «Таніо» (1980 р.), «Глобе Асімі» (1982 р.), що стали причиною отруєння величезних водних просторів та узбережжя; аварії на нафтопроводах (Комі, 1994 р.), нафтобазах (Львів, 1991 р.) та в портах (Херсон, 1991 р.).

Внаслідок цих викидів хворіють і гинуть люди, зазнає великих втрат рослинний і тваринний світ.

#### *Експлуатація військової техніки*

Війни та воєнні конфлікти, а також повсякденна експлуатація військової техніки теж призводять до забруднення довкілля.

У період першої та другої світових воєн безпосередньо під військовими операціями було зайнято відповідно 4,1 та 22,6 млн км<sup>2</sup> земель. Бойові дії спричиняють винищення рослинного покриву, ерозію ґрунтів, незворотні зміни ландшафту. Війна у В'єтнамі супроводжувалася появою понад 10 млн вирв від авіабомб, винищенням потужними бульдозерами джунглів, отруєнням рослинності гербіцидами й дефоліантами, яких у Південному В'єтнамі було розпилено понад 72 млн літрів, забрудненням атмосфери димом з палаючих лісів та боліт, нафтосховищ. Під час ірано-іракської війни 1981 р. та конфлікту в Перській затоці 1983 р. було розв'язано танкерну війну. Внаслідок бомбардування танкерів і нафтосховищ утворилися великі зони розливу на морській поверхні нафти. Площа однієї із таких зон становила кілька тисяч квадратних миль. Воєнні дії Іраку проти Кувейту призвели до численних пожеж нафтових свердловин і забруднення навколишнього середовища. Останнім часом трапляються непоодинокі випадки забруднення морської акваторії військовими кораблями. Так, з американського авіаносця «Індепенденс» у районі узбережжя США (на відстані 300 км від берегової лінії) було вилито понад 34 тис. тонн пального. Велику небезпеку для природи становлять воєнні полігони, призначені для перевірки озброєнь та відпрацювання військових операцій. Екологічною «міною вповільненої дії» є також боєприпаси (бомби, снаряди тощо), що відслужили свій строк чи застаріли, які затоплюють в океані або підривають. Внаслідок аварій авіаційної й морської техніки можуть з'явитися небезпечні джерела екологічних катастроф. Так, у 1963 р. затонув американський підводний човен «Трешер» з ядерним реактором на борту. В 1966 р. у небі

Іспанії зіткнулися два американських військових літаки — бомбардувальник Б-52 і літак-заправник К-135. Бомбардувальник був оснащений чотирма водневими бомбами. Три з них впали на землю біля іспанського села Паломарес. Хоча вони не вибухнули, проте дві з них було пошкоджено. Внаслідок випромінювання плутонію забруднено великі площі родючого ґрунту та уражено посіви сільськогосподарських культур; мешканці цього району зазнали опромінення. У 1968 р. на відстані 11 км від бази ВПС США у містечку Тула (Гренландія) сталася катастрофа американського стратегічного бомбардувальника Б-52 з чотирма водневими бомбами на борту. Три з них під час удару літака об лід затоки Північна зірка розкололися й спалахнули, і, не вибухнувши, затонули. Того ж року в північній частині Тихого океану внаслідок випадкового зіткнення з атомним підводним човном, що належав ВМС США, затонув радянський ракетний підводний човен К-129. Командир та 98 членів екіпажу загинули. У 1986 р. за 1000 км від Бермудських островів на радянському підводному човні з балістичними ракетами на борту спалахнула пожежа, яку вдалося загасити. Проте човен пішов на дно, де лежить дотепер. У 1989 р. у Норвезькому морі затонув радянський атомний підводний човен «Комсомолец» з ядерним реактором та двома торпедами з ядерними боеголовками на борту, що лежить на глибині 1680 м. Роботи, пов'язані з підйомом його на поверхню, дуже ризиковані через можливість розвалу корпусу.

### Освоєння космосу

Не може залишатися без наслідків для довкілля запуск космічних кораблів і супутників. На сьогодні у космічному навколоземному просторі налічується понад 17500 різних об'єктів розміром від одного до 10 см, а також 7500 — понад 10 см. Це насамперед діючі й уже не діючі супутники, частини ракет, баки від пального, ковпаки від лінз, уламки ракет, що вибухнули (рис. 1.3). Крім того, в космосі чимало радіоактивних металевих часток та охолоджувача — рідкої сумі-

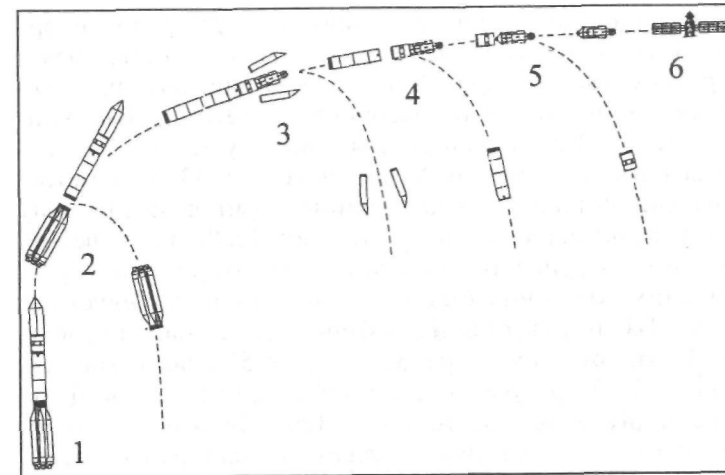


Рис. 1.3. Основні етапи виведення космічного корабля в космос: 1 — старт; 2 — відділення першого ступеня; 3 — скидання обтікача; 4 і 5 — відділення другого і третього ступенів; 6 — орієнтація на орбіті

ші калію з натрієм. Швидкість руху таких дрібних об'єктів — 10 км/с щодо космічного апарата; при їх ударі можливі не лише вм'ятини, а й пробоїни. Виведення на орбіту космічних кораблів супроводжується виливанням у довколоземний простір залишків пального. Так, під час запуску «Шатла» у верхні шари атмосфери викидається понад 300 т окису алюмінію; при здійсненні річної програми запусків (52 за рік) ця кількість збільшується до 1000 т. Розпорошені частки зазначеної речовини відбивають сонячне проміння, що прискорює загальне зниження температури повітря на планеті. В цілому на низьких орбітах (між 150 та 2000 км), де ведуться спостереження за Землею, та на геостаціонарних (36000 км, використовуваних для телекомунікацій), перебуває 2676 об'єктів космічного сміття, що належить США; 2359 — Росії і близько 500 — країнам Західної Європи. Випадки некерованого падіння космічних апаратів на Землю мають винятковий характер. Таких аварій небагато — падіння американської станції «Скайлеб» на Австралію, радянської станції «Салют-7» — на Чілі. Але деякі космічні апарати

мають на борту ядерні реактори, що є джерелом енергії. Внаслідок аварії на одному з них («Космос-954») при спускові на терен Канади було виявлено радіоактивні уламки реактора масою 65 кг (1978 р.). Ще один супутник «Космос-1402» з ядерною установкою розпався над Південною Атлантикою в 1983 р. З метою безпеки у 1988 р. було аварійно зруйновано активну зону реактора супутника «Космос-1900» на невеликій частині. Серйозною проблемою є захоронення орбітальних космічних станцій, термін яких закінчується. Так, 140-тонна станція «Мир» має в найближчому майбутньому впасти на Землю між 52 градусами північної і 52 градусами південної широти — в зоні, де розташовані всі континенти. Станція «Мир», окрім великої ваги, має дуже складну конфігурацію, отже, дуже важко передбачити точну траєкторію її падіння. Зовсім не виключене розпорошення модулів станції у просторі. Згідно з оцінками спеціалістів, до поверхні Землі долетить у межах 10% всіх конструкцій станції, тобто 10 тис тонн.

## Глава 2. АБІОТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

### МЕХАНІЧНІ ФАКТОРИ

#### Тиск

Тиск  $p$  — це фізична величина, що характеризує напружений стан суцільного середовища. Середня величина тиску на будь-яку площину дорівнює відношенню середнього значення сили, що діє перпендикулярно цій площині, до її площі:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}. \quad (2.1)$$

Одиниці вимірювання тиску в системі СІ:  $[p] = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Позасистемні одиниці:

1 атм = $1,013 \cdot 10^5$ Па;	1 Па = $9,87 \cdot 10^{-6}$ атм;
1 мм рт. ст. = 133 Па;	1 Па = $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
1 бар = $10^5$ Па;	1 мбар = 100 Па;
1 тор = 133 Па;	1 гПа = 100 Па.

Залежність тиску атмосфери від висоти визначається як:

$$h = 8000(1 + \alpha t) / p \text{ м/гПа}, \quad (2.2)$$

де  $p$  — тиск в гПа;  $t$  — температура в °C;  $\alpha = 0,004 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$  — коефіцієнт об'ємного розширення повітря.

Залежність тиску від глибини визначають за рівнянням:

$$p = p_A + \rho gh, \quad (2.3)$$

де  $p_A \sim 1,01 \cdot 10^5$  Па — атмосферний тиск;  $\rho$  — густина рідини;  $h$  — глибина.

Рух рідини, в якій відсутні сили внутрішнього тертя (в'язкості) та яка нестислива, супроводжується появою тисків, що описуються рівнянням Бернуллі; при зміні



перерізу труби змінюється не тільки швидкість рідини, яка рухається, але й тиск, так що у будь-якому перерізі виконується умова:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \text{const}, \quad (2.4)$$

де  $p$  — статичний тиск, тобто тиск, який би показував у відповідних точках манометр, що рухається разом з рідиною;  $\rho \cdot g \cdot h$  — гідростатичний тиск, викликаний вагою рідини;  $\frac{\rho \cdot V^2}{2}$  — динамічний тиск, зумовлений рухом рідини.

Для горизонтально розміщеної трубки рівняння Бернуллі має вигляд:

$$p + \frac{\rho \cdot V^2}{2} = \text{const}. \quad (2.5)$$

### Вимірювання тиску

Тиск вимірюють за допомогою таких приладів як:

1. барометр, що може бути чашечкового (рис. 2.1) і сифонного (рис. 2.2) типів;

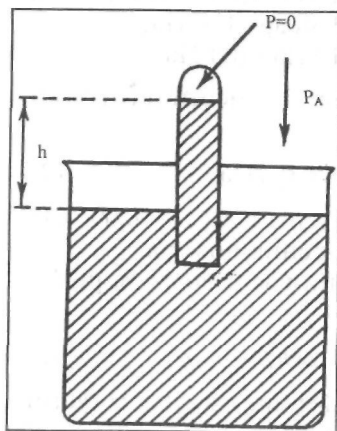


Рис. 2.1. Чашечковий барометр:  $h$  — різниця рівнів;  $P_A$  — атмосферний тиск

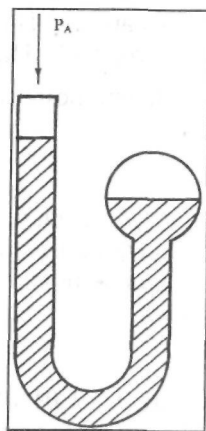


Рис. 2.2. Сифонний барометр:  $P_A$  — атмосферний тиск

2. барометр-анероїд, в основі якого — анероїдна коробка, що складається з двох гофрованих мембран, між якими відкачано повітря. Коли тиск зростає, верхня мембрана вгинається; при зменшенні тиску мембрана підіймається догори під дією пружини. Через систему важелів коливання мембран передається на стрілку приладу (рис. 2.3);

3. барограф — прилад, що використовується для безперервної реєстрації тиску повітря. Він складається із стовпчика анероїдних ко-

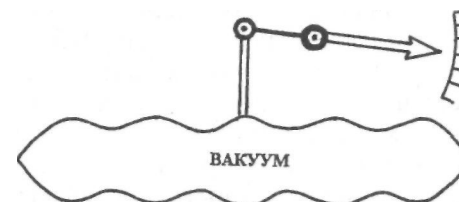


Рис. 2.3. Анероїдна коробка зобок, з'єднаного зі стрілкою самописа (рис. 2.4)

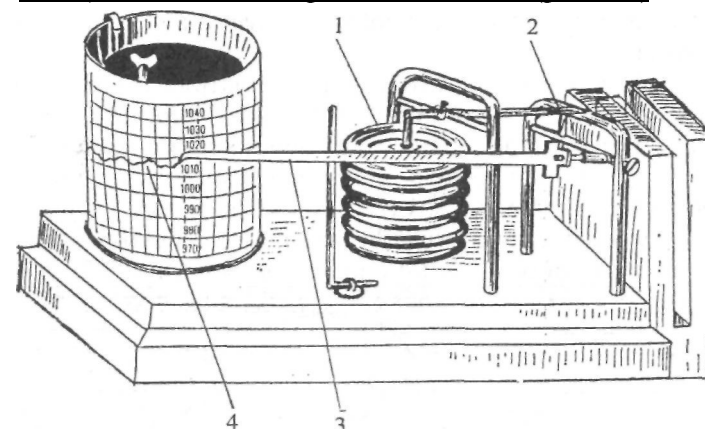


Рис. 2.4. Барограф: 1 — анероїдні коробки; 2 — передавальний механізм; 3 — стрілка з пером на кінці; 4 — барабан з паперовою стрічкою

### Вплив тиску на живі організми

Атмосферний тиск зменшується на висотах 2500—3000 м, що зумовлює відповідне зниження парціального тиску кисню в альвеолярному повітрі до 55—60 мм рт. ст. Недостатня насиченість крові киснем називається гіпоксією. Посилення вентиляції легень призводить до збільшення кількості двоокису вуглецю, що переходить з крові в легені, і зменшення кислотності

крові. Зростання лужності (рівня рН) крові викликає стан, що називається *алкалозом*. З часом дихальна й кровоносна системи можуть пристосовуватися (акліматизуватися) до низького парціального тиску кисню.

Життєдіяльність людського організму може зберігатися в широких межах зміни атмосферного тиску, особливо, якщо перехід до нових умов відбувається поступово: мешканці високогірних районів пристосовуються, наприклад, до тисків порядку 0,5 атм. Але коли звичайна людина зазнає різких змін атмосферного тиску, у неї порушуються серцево-судинна діяльність та газообмін. Під час надмірних знижень тиску людина страждає від *гірської хвороби*; гостре кисневе голодування може призвести до непритомності, сильної задишки.

У той же час у високогірних архарів у рогах є спеціальні порожнини, в яких утворюються додатково еритроцити і гемоглобін, необхідні тваринам для акліматизації.

Під час роботи на глибині азот повітря потрапляє в кров людини і розчиняється в кількості, пропорційній зміні тиску. При швидкому переході від високого тиску до нормального в людини розвивається *кесонна хвороба*, що супроводжується виділенням азоту і утворенням бульбашок газу. За рахунок дії потоку крові форма кожної бульбашки спотворюється (рис. 2.5); лі-

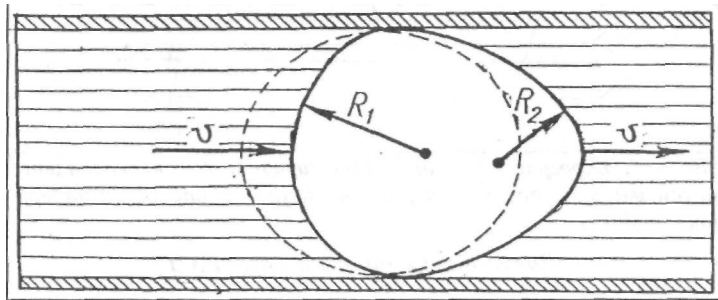


Рис. 2.5. Виникнення газової емболії за руху крові в судині, що викликає деформацію бульбашки газу ( $R_1/R_2$ , різницевий тиск і розрив судини)

ва й права півсфери мають різні за величиною радіуси кривизни  $R$ , і  $R_x$ . Згідно з формулою Лапласа додатковий тиск визначається як:

$$\Delta p = \pm \frac{2 \cdot \alpha}{R}, \quad (2.6)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт поверхневого натягу,  $R$  - радіус кривизни поверхні рідини.

Отже, додаткові тиски, зумовлені поверхневим натягом рідини на правій та лівій межах поділу, будуть відрізнятися. Цей різницевий тиск, спрямований проти потоку крові, може призвести до розриву або закупорювання судин. Захворювання такого типу називається *газовою емболією*.

Під час занурювання у воду гідростатичний тиск зростає приблизно на 1 атм з кожними 10 м глибини. Глибоководні риби пристосовані до високих значень гідростатичного тиску. В той же час багато водних організмів відчувають зміни цього тиску: планктон мігрує, ракоподібні реагують зміною рухливості, плавальний міхур риб - виділенням газу. Водні тварини, які поринають у морські глибини, здатні зазнавати значних змін у перерозподілі кисню. Наприклад, тюлень залишається у воді протягом 15 хвилин. При цьому відбувається рефлекторне зниження частоти серцевих скорочень; тиск крові залишається сталим, оскільки судини звужуються (аж до повного закупорювання деяких з них). Завдяки цьому кисень використовується повільно й забезпечує діяльність лише найважливіших органів. Універсальною реакцією серцево-судинної системи тварин, які занурюються в глибинні шари, є *брадикардія* - зменшення частоти пульсу. У морського слона (*Mirounga*) пульс зменшується від 60 до 4 ударів за хвилину; у черепахи (*Pseudemys*) - до 41% того, що був на поверхні.

Багато тварин використовують гідростатичний тиск для пересування у просторі (павуки), розкривання черепашки двустулкового молюска (морські зірки), влаштування нір (молюски, черви).

#### Тиск крові в живих організмах

Робота-серця людини й тварин зумовлює виникнення *артеріального тиску*, який діє на стінки артерій і залежить від рівня стискування крові. Тиск, що ви-

никає при скороченні серця, називається *систолічним*; тиск, що виникає при розслабленні серця, називається *діастолічним*. Артеріальний тиск вимірюється у мм. рт. ст. і позначається як відношення систолічного тиску до діастолічного. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця зображено на рис. 2.6. Видно, що

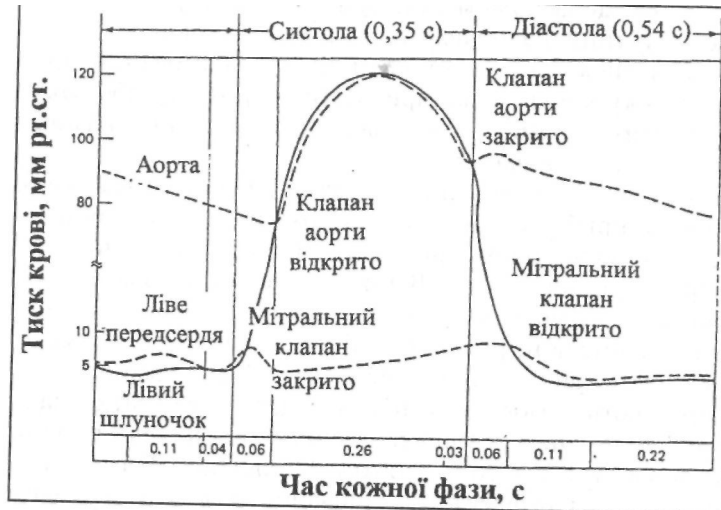


Рис. 2.6. Залежність тиску крові від часу в процесі роботи серця

зміни тиску відбуваються практично від нуля до 120 мм рт. ст. Різниця між систолічним і діастолічним тисками являє собою *пульсовий тиск*. Типові значення систолічного, діастолічного і пульсового тисків у кровоносній системі живих істот наведено у табл. 2.1.

### 2.1. Типові значення тисків у кровоносній системі живих істот

Істота	$P_{max}$ мм рт.ст.	$P_{min}$ мм рт.ст.	$\Delta P$ , мм рт.ст.
Людина	100+140	60+90	—
Кінь	172	123	49
Велика рогата худоба	98+128	69+99	29
Свиня	139	99	40
Вівця	151	114	37

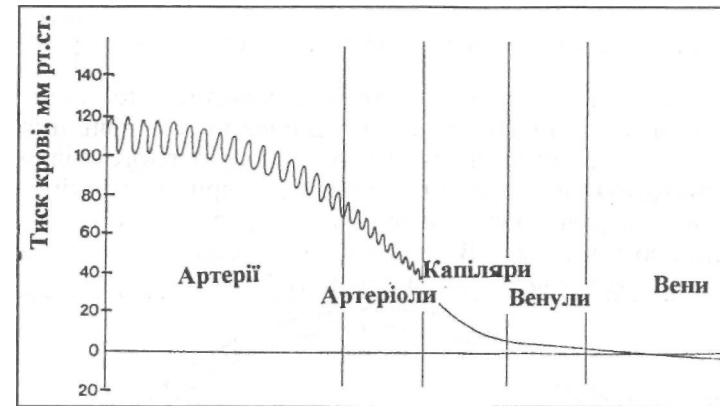


Рис. 2.7. Тиск крові в різних ділянках кровоносної системи

Значні для артеріальної системи зміни тиску крові від систоли до діастолу згладжуються до відносно постійного рівня (рис. 2.7) при проходженні крові через дрібні судини.

### Фізичні принципи захворювань кровоносних судин

Розглянемо фізичні принципи захворювань кровоносних судин, пов'язаних з ущільненням судини за утворення на внутрішній стінці кров'яних згустків або дифузним розширенням отвору внаслідок патологій стінок.

**Тромбоз.** При зменшенні величини перерізу  $S$  судини при тромбозі спостерігається збільшення швидкості  $K$  течії крові у місцях меншого перерізу (рис. 2.8)

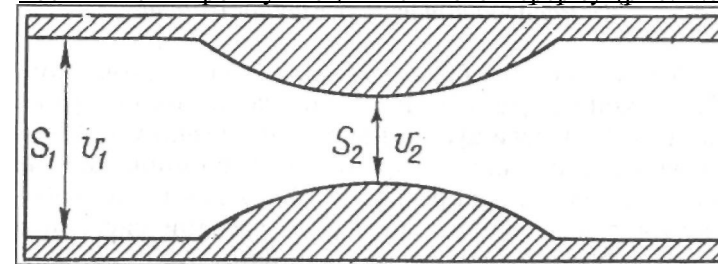


Рис. 2.8. Звуження кровоносної судини внаслідок тромбозу

згідно з законом нерозривності потоку  $S = \frac{const}{V}$  збільшення швидкості  $V$  течії призводить до зменшення статичного тиску  $p$  відповідно до рівняння (2.5). Зменшення цього тиску нижче певного рівня призводить до закриття судини. Але при цьому кінетична енергія крові, що рухається, зростає, і отвір судини збільшується. Виникають коливання кровеносної судини (*флаттер*), що викликають болісні відчуття.

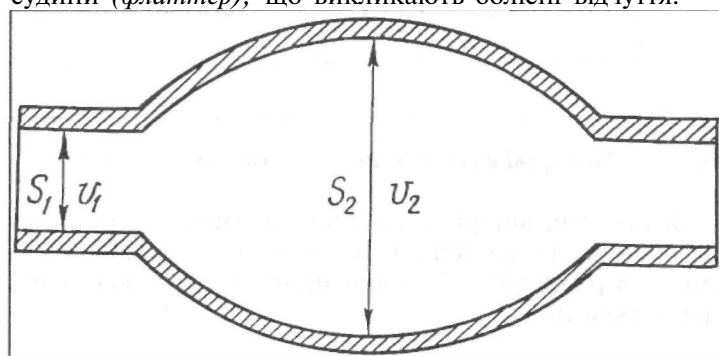


Рис. 2.9. Розширення перерізу кровеносної судини внаслідок аневризми

**Аневризма.** При розширенні перерізу  $S$  судини (рис. 2.9) швидкість течії  $V$  зменшується (закон нерозривності потоку), але статичний тиск  $p$  зростає (рівняння Бернуллі). Цей надлишковий тиск може призвести до крововиливу.

#### Осмотичний тиск у рослинній клітині

Розглянемо мембрану  $M$  між двома розчинами різної концентрації (рис. 2.10), коли концентрація розчину II перевищує концентрацію розчину I. Мембрана напівпроникна і пропускає розчинник, але не молекули розчиненої речовини. Внаслідок цього відбувається перенесення води з лівої частини системи в праву, що супроводжується збільшенням об'єму рідини в правій частині і підвищенням її рівня до тих пір,

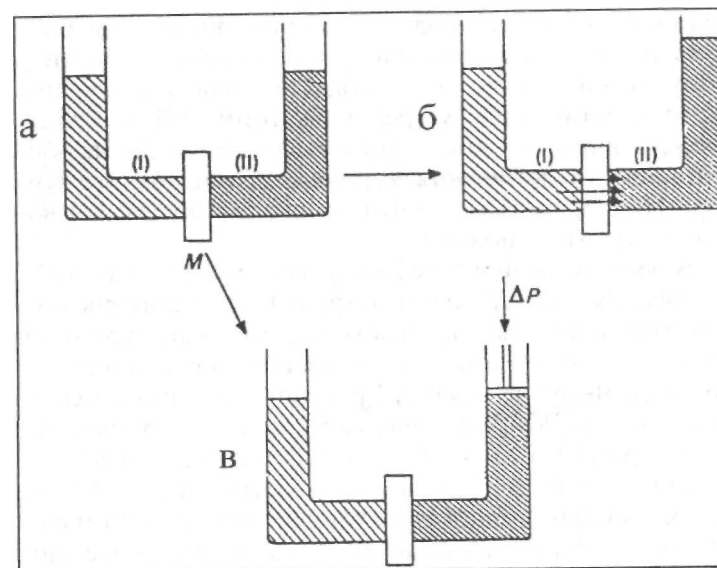


Рис. 2.10. Мембрана, що розділяє два розчини (I і II) з різною концентрацією: а. Ідеальна напівпроникна мембрана; б. Перенесення води з лівої частини в праву; в. Протидія гідростатичного тиску  $p$  підніманню правої частини

доки гідростатичний тиск  $p$  стовпчика води не стане протидіяти подальшому зростанню об'єму розчину. Гідростатичний тиск у цьому разі відповідає *потенціальному осмотичному тиску*, який визначають за формулою:

$$p = RT \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (2.7)$$

де  $R$  — універсальна газова стала;  $T$  — абсолютна температура;  $C_1$  і  $C_2$  — концентрації речовини в відсіках I і II.

У рослинній клітині відбуваються схожі явища. Роль мембрани відіграє система, яку складають *плазмалема* (клітинна мембрана) і *тонопласт* (вакуолярна мембрана). У природі рослинні клітини перебувають у

водному оточенні. Вода проходить крізь мембрану значно легше, ніж речовини, що містяться в клітинному розчині. Саме тому вода надходить у клітину, завдяки чому тиск усередині клітини збільшується. Тиск, з яким діє вміст клітини {протопласт} на клітинну стінку, називають *тургорним*. Стан повного тургору спостерігається в клітинах під час достатньої вологості ґрунту й повітря.

В умовах водного дефіциту (наприклад, внаслідок суховію або нестачі вологи в ґрунті) в молодих рослинних тканинах різко зростають втрати води, тургорний тиск стає від'ємним і протопласти зменшуються за об'ємом. Через це клітини і рослинні тканини в цілому стискаються. Рослина в'яне, листя й стебла поникають.

З тургорним тиском пов'язані *тигмонастичні рухи* рослин, зумовлені механічними дотиками. Такі рухи характерні для чутливої рослини — мімози соромливої (*Mimosa pudica*), листя якої раптово поникає внаслідок дотику. Така реакція є результатом різкої зміни тургорного тиску в клітинах біля основи листків. Серед можливих пояснень такої реакції рослини можна виділити протидію суховіям для збереження води або відлякування комах.

#### Рух повітря

Рух повітря відносно земної поверхні називається *вітром*. Утворення повітряних потоків відбувається завдяки дії таких причин:

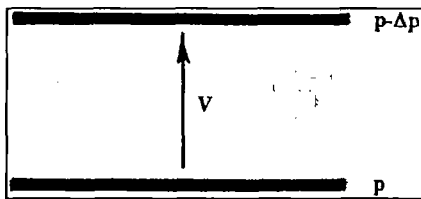


Рис. 2.11. Градієнти тиску, що забезпечують рух повітря від області високого тиску до області низького тиску

1. Градієнти тиску, що забезпечують рух повітря від області високого тиску до області низького тиску (рис. 2.11).

2. Гравітаційна сила, що прискорює рух повітря до величини  $g = 9,8 \text{ м-с}^{-2}$  (рис. 2.12). Дія вертикального градієнта тиску врівноважується гравітаційною силою.

#### 3. Сила тертя, яку визначають як:

$$(2.8)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт внутрішнього тертя, що залежить від характеру підстилаючої поверхні;  $V$  — швидкість вітру. Сила тертя пропорційна швидкості вітру і має протилежний останньому напрям (рис. 2.13).

4. Сила Коріоліса, що відхиляє напрямок руху повітря (праворуч у північній напівкулі, ліворуч — у південній). Визначається ця сила за виразом:

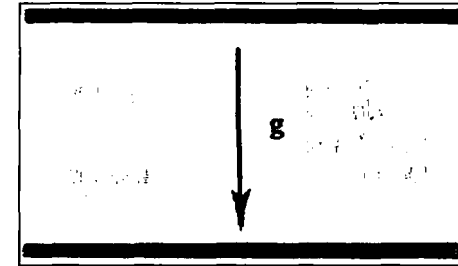


Рис. 2.12. Гравітаційна сила, що прискорює рух повітря

$$F_k = 2\rho V\omega \sin\varphi, \quad (2.9)$$

де  $\rho$  — густина повітря;  $V$  — швидкість руху повітря;  $\omega$  — кутова швидкість обертання Землі ( $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ );  $\varphi$  — широта місцевості.

Розглянемо причини виникнення сили Коріоліса. У системі відліку, що обертається, матері-

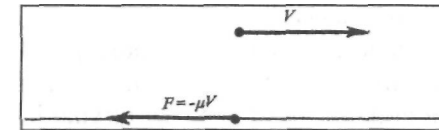


Рис. 2.13. Сила тертя:  $V$  — швидкість руху повітря;  $\mu$  — коефіцієнт тертя

альної точки, яка рухається не паралельно осі цього обертання, відхиляється у напрямку, перпендикулярному її швидкості. На Землі цей ефект, зумовлений її добовим обертанням, призводить до того, що вільно падаючі тіла відхиляються до сходу, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в північній напівкулі праворуч від напрямку руху, а в південній — ліворуч. На екваторі  $\sin \varphi = 0$  і  $F_k = 0$ ; на полюсах  $\sin \varphi = 1$ , отже сила Коріоліса максимальна. Звичайно під терміном «вітер» ми розуміємо горизонталь-

ний рух повітря. Баланс сил, що характеризує цей рух, має вигляд:

$$2\rho V\omega \sin\varphi = \frac{dp}{dn} \quad (2.10)$$

де  $\frac{dp}{dn}$  — градієнт тиску, тобто зміна тиску відносно ізобари на відстані  $n$ .

Останнє рівняння визначає появу *геострофічного вітру* — ідеалізованої ситуації, близької до реальної на висотах від 600 до 1000 м над землею поверхнею.

5. *Відцентрова сила*, що визначається за формулою:

$$F_g = \frac{mV^2}{r}, \quad (2.11)$$

де  $r$  — радіус криволінійної траєкторії. При великих швидкостях і малих радіусах кривизни  $F_g$  може значно перевищувати градієнтну силу (тропічні циклони, смерчі).

Основні параметри вітру — *швидкість, напрям, поривчастість*.

Залежно від швидкості руху  $V$  розрізняють вітер: помірний ( $V = 5 \div 8$  м/с); сильний ( $V > 14$  м/с); штормовий ( $V = 20 \div 25$  м/с); ураганний ( $V > 30$  м/с). В Антарктиці швидкість вітру сягає 65 м/с, у тропіках — 110 м/с. Швидкість вітру  $V$  залежить від висоти  $h$  над рівнем моря:  $V = 5$  м/с ( $h = 20$  м);  $V = 20 \div 25$  м/с ( $h = 300$  м);  $V = 60 \div 80$  м/с ( $h = 10 \div 17$  км).

Напрямок вітру визначають щодо сторін світу і позначають у *румбах* (всього їх 16): північний, північно-східний, східний тощо.

Поривчастість вітру — це скачкоподібні посилення і послаблення швидкості  $\Delta V$  вітру;  $\Delta V = \pm 3$  м/с при  $V = 5 \div 10$  м/с;  $\Delta V = \pm 5 \div 7$  м/с при  $V = 11 \div 15$  м/с.

Розглянемо повітряні потоки, що викликають стресові ситуації.

*Смерч* — сильний маломасштабний вітер з вертикальною віссю, що має велику швидкість обертання. В Америці його називають *торнадо*. Причиною смерчу є великі градієнти тиску, нестійкість нижнього шару атмосфери (до 2 км), що виникає при зіткненні сухих холодних повітряних мас з теплими й вологими. Діаметр смерчу сягає 100 м над водною поверхнею, від кількох десятків до кількох сотень метрів над землею поверхнею. Висота смерчу — 100 м. Характерна особливість — спіралеподібний рух повітря навколо вертикальної осі. Швидкість руху становить 50—100, інколи — 250 м/с, причому є вертикальна компонента швидкості в межах 70—90 м/с. Тривалість смерчу — від кількох хвилин до кількох годин. Як приклади можна навести смерчі в США: в 1925 р., коли загинуло 695 людей і в 1999 р., що спричинив десятки загиблих.

*Суховій* — вітер, що виникає при високій температурі (понад 25 °С) і вкрай низькій відносній вологості (менше 30%). Спостерігаються суховії в степових та лісостепових зонах. Швидкість руху повітря сягає 5—20 м/с.

*Пилові бурі* виникають на оголених земельних ділянках, на розпиленому і висушеному ґрунті, на розораних схилах. Основним фактором, що сприяє пиловій бурі, є сильний вітер (понад 10 м/с) і відносна вологість, що не перевищує 50%. В Україні у степовій зоні буває за рік 4—5 днів з пиловими бурями, а в деяких областях — 10—15 днів.

*Бора* — сильний, холодний, поривчастий вітер, що походить з області невисоких гірських хребтів і пересувається у бік теплого моря. Утворюється в холодну пору року, коли над холодним континентом виникає область підвищеного тиску, а над теплим морем — область низького тиску. Над хребтом переріз повітряного потоку зменшується, а швидкість зростає, досягаючи 40—60 м/с, температура повітря при цьому може знижуватися до — 20 °С. Тривалість бори — 1—3 дні.

#### Вимірювання параметрів вітру

Прилади, що визначають швидкість руху повітряних потоків, називають *анемометрами*. Принцип їх дії полягає у перетворенні енергії поступального руху по-

вітря в механічне обертання різноманітних вертушок, вітрових колес або гвинтів. Крім того, існують *термоанемометри*, що ґрунтуються на реєстрації впливу вітру на температуру нагрітого тіла; *ультразвукові анемометри*, де використовується принцип Доплера; *іонізаційні анемометри*, принцип дії яких полягає в перенесенні іонізованих частинок повітряними потоками. Одночасне вимірювання швидкості і напрямку руху повітря здійснюється за допомогою *анеморумбометра*. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється в послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

#### Вплив вітру на живі організми

Більшість тварин, які літають, демонструють здатність орієнтуватися у повітряних потоках (*анемотаксис*). Мухи мають рецепторні органи на антенах, які чутливі до вітру і допомагають змінити положення тіла відповідно до напрямку і швидкості вітру. Жуки мо-

жуть орієнтуватися за напрямком вітру завдяки джонстонівському органу на антенах. Медоносна бджола здатна оцінювати швидкість потоків повітря та їх напрямок під час польоту завдяки чутливим волоскам, що діють як *аеродинамічні датчики*. Розташовані ці волоски на складних очах бджоли (рис. 2.14), на деяких ділянках голови та крилах. Оцінка швидкості руху щодо земної поверхні відбувається візуально, за допомогою фоторецепторів. Затрати енергії під час польоту дають змогу

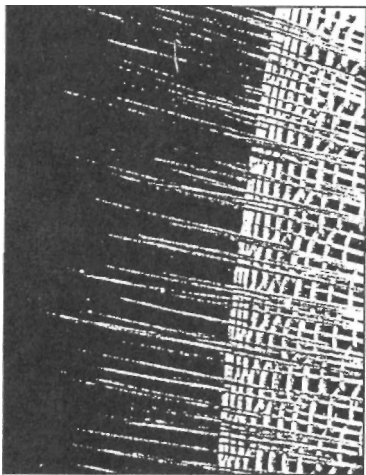


Рис. 2.14. Фрагмент складного ока бджоли: між фасетками розміщені чутливі волоски, що діють як рецептори повітряних потоків

бджолі мати уявлення про відстань польоту. Крім того, бджола отримує інформацію через *рецептори тиску*, що містяться на стінках медового мішка: тиск зменшується, якщо мішок спорожнюється. Сенсорні волоски сарани збуджуються при їх зміщенні під впливом вітра і генерують імпульси з частотою 245 Гц, а при тривалій стимуляції — з частотою 50-70 Гц.

Вітровий режим, безсумнівно, впливає на тваринництво, особливо на продуктивність бджіл.

На відкритих місцях вітер може пригнічувати розвиток рослин, особливо дерев, що ростуть на відкритих місцях; вітру призводить до затримки їх росту та викривленню стовбура, збільшення транспірації в умовах низької вологості, поширення міграції насіння та плодів.

Під час ураганів можливе перенесення рослин і тварин на великі відстані, що впливатиме на склад лісових суспільств. Негативними наслідками дії сильних вітрів є інтенсифікація процесу випаровування, видурвання посівів, пошкодження сходів, повітряна ерозія, вилягання зернових культур, вітровали і буреломи.

#### Дія зовнішніх сил на частинки

*Частинки* — це окремі порції твердої, рідкої або газоподібної речовини, розміри яких перевищують 1 нм. На рис. 2.15 наведено шкалу розмірів частинок, важливих з точки зору екології. Залежно від стану частинок та середовища користуються певною термінологією (табл. 2.2). Концентрацію частинок оцінюють у  $г/м^3$ ,  $мкг/м^3$ ,  $мг/л$ ,  $млн$  або у *відсотках* (якщо концентрація перевищує  $10^4$  мг/л).

Розглянемо частинку масою  $m$  і густиною  $\rho$ , занурену у рідке середовище з густиною  $\rho_0$ . На цю частинку діють:

*гравітаційна сила*

$$F_g = mg = V\rho g, \quad (2.12)$$

*спрямована донизу, і архімедова сила*

$$F_0 = m_0 g = V\rho_0 g, \quad (2.13)$$

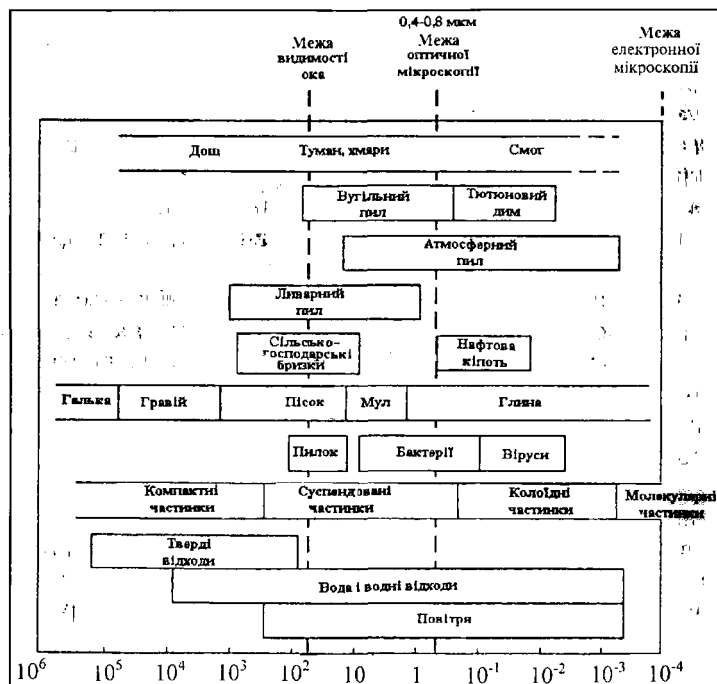


Рис. 2.15. Шкала частинок, що зустрічаються в навколишньому середовищі (розміри – в мікрометрах)

спрямована догори і чисельно дорівнює вазі  $m_g$  рідини, виштовхнутої частинкою. Результуюча сила дорівнює:

$$F_s = F_{sp} - F_0 = V\rho g - V\rho_0 g = V g (\rho - \rho_0). \quad (2.14)$$

## 2.2. Термінологія, що вживається залежно від стану частинок та середовища

Стан частинки	Стан середовища	Термін
Тверда	Рідина	Суспензія ( $> 0,4\mu\text{м}$ ) Колоїд ( $1-400\text{ нм}$ ) Розчин ( $< 1\text{ нм}$ )
Рідка	Рідина	Емульсія
Газоподібна	Рідина	Піна
Тверда	Газ	Дим, аерозоль
Рідка	Газ	Туман, аерозоль

Якщо  $\rho < \rho_0$ , результуюча сила спрямована догори (процес *випливання*); якщо  $\rho > \rho_0$ , результуюча сила спрямована донизу (процес *седиментації*).

У той же час рідке середовище характеризується *в'язкістю* (внутрішнім тертям). У разі частинки сферичної форми радіуса  $r$  сила опору, зумовлена в'язкістю, визначається за законом *Стокса*:

$$F_\eta = 6\pi\eta r V \quad (2.15)$$

і швидкість седиментації – як:

$$V_{sed} = V g (\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) / 6\pi\eta r = \frac{2}{9} g (\rho - \rho_0) r^2 / \eta. \quad (2.16)$$

## Дія гравітаційної сили на живі організми

*Тропізмом* взагалі називають ростову реакцію рослин, що спричиняє вигин або викривлення її певної частини у бік зовнішнього стимула. Якщо рух спрямований до стимула, кажуть про *позитивний тропізм*; якщо в протилежний бік – про *негативний тропізм*. Коли зовнішнім стимулом є гравітаційна сила, то реакція рослини на неї називається *гравітропізмом*. Рослина, покладена в горизонтальне положення, спрямовує паростка догори (*негативний гравітропізм*), а корінь – донизу (*позитивний гравітропізм*). Згідно з сучасним уявленням сприймання гравітаційної сили відбувається за рахунок осідання *амілопластів* – пластид, що містять крохмаль. Ці пластиди при зміні положення рослини переміщуються донизу і затримуються біля клітинних стінок. Рух рецепторів гравітації сприяє транспорту гормонів, в якому, можливо, бере участь кальцій. Внаслідок переміщення пластид утворюється градієнт ростових речовин, що забезпечують вертикальний ріст паростка або кореня.



Гравітаційне поле Землі є важливим зовнішнім фактором для організмів, що пересуваються у ґрунті та водному середовищі. Таку здатність організмів орієнтувати напрямок свого руху щодо гравітаційного поля називають *гравітаксисом*. Найпростіші (*Paramecium*) мають *негативний гравітаксис*, а більшості безхребетних, що риють нори (жукам, равликам тощо), властивий позитивний гравітаксис. Гравітаксис спостерігається у таких водоростей як *Euglena gracilis*, *Chlamydomonas nivalis*, *Cryptomonas*, *Peridinium gatunense* та *P. faeroense*, *Amphidinium catereae*, *Prorocentrum micans*, *Dunaliella salina*. Напрямок гравітаційної орієнтації організмів залежить від виду та віку водорості. Так, *Peridinium faeroense* та молода популяція *Euglena gracilis* демонструють позитивний гравітаксис, в той час як *Chlamydomonas nivalis*, *Peridinium gatunense*, *Amphidinium catereae*, *Prorocentrum micans* та старим популяціям *Euglena gracilis* притаманний негативний гравітаксис. Рівень гравітаційної орієнтації водоростей визначається віком культури та порою доби, наявністю важких металів у середовищі, впливом сонячного, зокрема ультрафіолетового випромінювання. Таким чином, гравітаксис є важливим екологічним фактором, що дає змогу водним організмам знаходити кращі умови існування.

## МЕХАНОРЕЦЕПЦІЯ

Складну будову має система, що перетворює енергію зовнішнього подразнення у послідовність нервових імпульсів, утворює *сенсорну систему* (або *аналізатор*; застарілий термін — *орган чуттів*). Сенсорна система складається з рецептора, доцентрового шляху та мозку. Фактори, що збуджують сенсорні враження певної якості, називають *стимулами*. Клітини сенсорної системи, здатні реагувати на стимули, називають *рецепторами*.

*Механорецептори* — це спеціалізовані чутливі утворення, призначені для трансформації механічного стимула в активність нервової клітини, що зумовлює поширення нервового імпульсу. Механорецептори здатні реагувати на різноманітні механічні стимули і контролювати:

1. *тактильну чутливість* (сприймання тиску, зміни тиску, дотику, вібрацій);
2. *вестибулорецепцію* (підтримання рівноваги);
3. *інтерорецепцію* (координацію руху окремих частин організму).

### Механорецептори шкіри

У шкірі міститься велика кількість механорецепторів. Якщо шкіра покрита волоссям, для неї характерні вільні нервові закінчення, диски Меркеля, нервові закінчення навколо волоссяних сумок. У шкірі без волоссяного покриву механорецепторами є вільні нервові закінчення, диски Меркеля, тільця Мейснера і Пачіні. У підсосочковому шарі дерми можна знайти колби Краузе; вглибині дерми — тільця Руфіні. Основні типи механорецепторів шкіри подано на рис. 2.16.

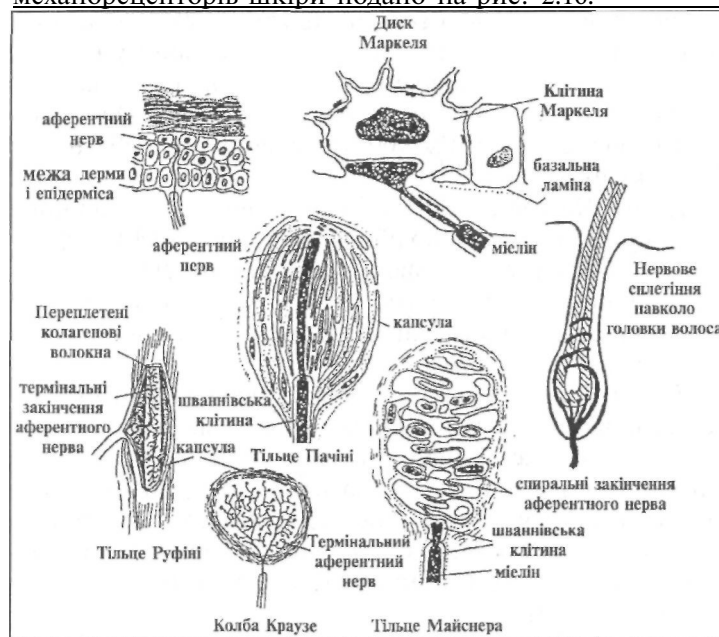


Рис. 2.16. Основні типи механорецепторів шкіри

*Вільні нервові закінчення* — найбільш поширені рецептори шкіри; вони входять до системи розвинутої мережі нервових волокон у поверхневих структурах

дерми. Вільні нервові закінчення часто розгалужуються і можуть займати велику площу.

*Диски Меркеля* містяться в нижній частині епідермісу. Волокна, що відходять від декількох дисків Меркеля, можуть об'єднуватися в єдине волокно, утворюючи єдину *тактильну корпускулу* діаметром  $100\text{--}500\text{ мкм}$ , що здійснюється над поверхнею шкіри. Кожна клітина Меркеля з'єднується з термінальним диском аферентного нервового волокна. Кількість дисків Меркеля в одній корпускулі може сягати  $30\text{--}50$ . Цей тип механорецепторів є, наприклад, на губах тварин.

*Нервові закінчення навколо волосся* являють собою нервові волокна, що густо обплітають структури волоссяної сумки. Кожна волосина оточена кількома волокнами; в той же час одне й те саме волокно може обплітати велику кількість волосин. Наприклад, у вусі кроля одне волокно охоплює близько 300 волоссяних фолікул на площі  $1\text{ см}^2$ . У тварин у волоссяному покриві бувають чутливі волосинки — *вібриси*, що локалізуються довкола ротового отвору. Кожна вібриса може бути оточена більш ніж 100 волокнами, що забезпечує її високу чутливість.

*Тільця Мейснера* виявляють в шкірі без волоссяного покриву. Вони конусоподібної або еліпсоподібної форми, містяться в сосочковому шарі дерми. Довжина тілця Мейснера становить  $90\text{--}200\text{ мкм}$ . Зовні кожне тілце вкрите тонкою капсулою, тісно зв'язаною з довколишніми тканинами.

*Тільця Пачіні* являють собою інкапсуловані закінчення в шкірі  $1\text{--}5\text{ мм}$  завдовжки і  $1\text{--}2\text{ мм}$  завширшки, розміщені в нижніх шарах дерми і в підшкірній жировій клітковині. Вони складаються із зовнішньої капсули, внутрішньої колби і немілінізованого нервового закінчення, зв'язаного з м'якушним нервовим волокном. Кожне тілце Пачіні обплетене товстими м'якушними волокнами.

*Колби Краузе* містяться в підсосочковому шарі дерми і являють собою сферичні утворення, вкриті капсулою. Внутрішнє середовище пронизане розгалуженою мережею закінчень аферентного нерва.

*Тільця Руфіні* веретеноподібної форми, оточені капсулою. Діаметр рецептора —  $150\text{ мкм}$ . Основу кожного тільця Руфіні становить складно переплетені колагенові волокна, зв'язані з численними розгалуженнями аферентного нервового волокна.

Згідно з гіпотезою про механорецепторне перетворення, на мембрані виникає рецепторний потенціал внаслідок того, що під впливом стимула зростає проникність мембрани для йонів  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$ , які переміщуються в напрямку їх електрохімічних градієнтів. Величина рецепторного потенціалу варіює залежно від інтенсивності зовнішнього подразнення. З досягненням рецепторним потенціалом певної порогової величини відбувається збудження *потенціалу дії*, що поширюється в сенсорному волокні. Частота нервових імпульсів у цьому волокні лінійно залежить від інтенсивності подразника.

#### Вестибулорецепція

Оцінка положення і переміщення тіла у просторі, що ґрунтується на визначенні напрямку дії лінійного чи обертального прискорення, становить суть *вестибулорецепції*. Цей тип рецепції реалізується за допомогою *вестибулярного апарата*, розміщеного у внутрішньому вусі, що складається з *переддвер'я* і *трьох напівкруглих каналів*, розташованих у взаємноперпендикулярних площинах (рис. 2.17). У порожнині переддвер'я розміщені

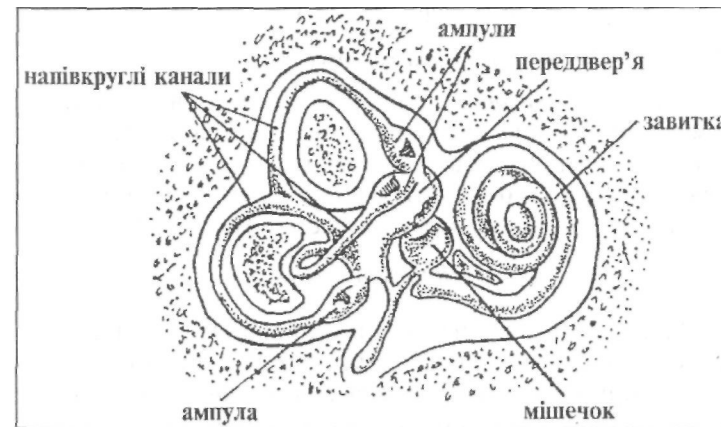


Рис. 2.17. Вестибулярний апарат

рецепторні клітини з волосками, занурені в желеподібну масу, що містить кристали карбонату кальція – так звані *отоліти*. Якщо голова людини або тварини схиляється, напівкруглі канали набувають прискорення, а ендолімфа намагається залишитися на місці через силу інерції. При цьому отоліти зміщуються і згинають волоски, що зумовлює збудження нервових клітин, зв'язаних з рецепторними клітинами, і передачу інформації до мозку про положення голови або тіла у просторі (рис. 2.18). Обидва внутрішніх вуха являють

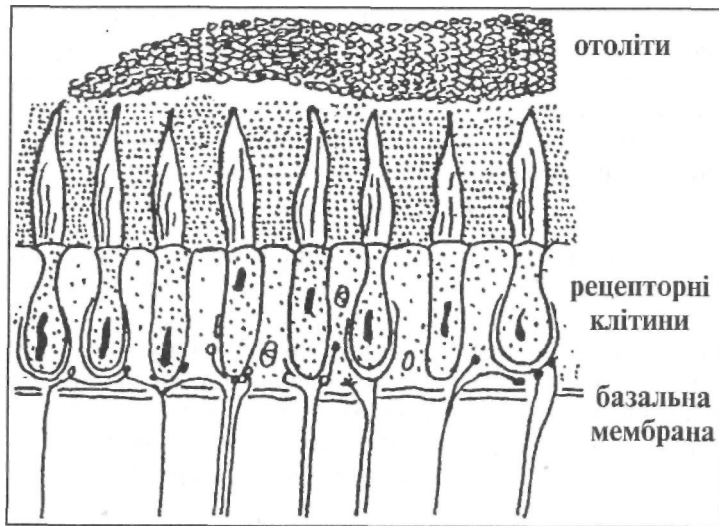


Рис. 2.18. Вміст порожнини переддвер'я

собою *білатеральну* рецепторну систему: якщо під час обертання голови ліві напівкруглі канали набувають прискорення, то праві — сповільнення. У мозку відбувається порівняння й аналіз частоти посилення біопотенціалів, що надходять з обох систем.

#### Інтерорецепція

Рецептори, локалізовані в серцево-судинній системі та внутрішніх органах, здатні сприймати подразники різної природи, називаються *інтерорецепторами*. Інтерорецептори поділяються на пропріорецептори та вісцеральні рецептори.

*Пропріорецептори* сигналізують про відносне положення різних частин тіла. Представлені ці типи механорецепторів *м'язовими веретенами* і *сухожильними органами Гольджі*.

М'язові веретена орієнтовані паралельно скелетним м'язам і зв'язані з сухожиллями (рис. 2.19); вони нада-

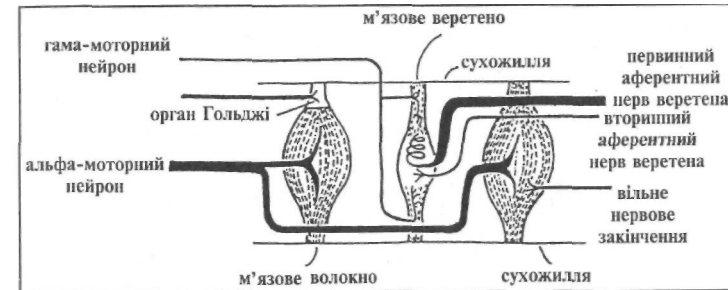


Рис. 2.19. М'язове веретено

ють інформацію про *видовження м'яза*. М'язове веретено являє собою інкапсульовану групу тонких і спеціалізованих м'язових ниток. Оскільки капсула, де містяться ці нитки, має веретеноподібну форму, ці нитки називають *внутрішньоверетеними*. Вони зв'язані з сухожиллями; причому, кінці цих ниток містять скоротливі білки, тоді як середня частина їх не має. Чутливий аферентний нерв м'язового веретена розміщений саме в середній частині веретена. Полярні кінці цього веретена мають власні рухливі нерви, які називаються *гама-моторними нейронами* (на відміну від *альфа-моторних нейронів*, що зв'язані з м'язовими волокнами). Під час скорочення або видовження скелетного м'яза змінюється довжина середньої частини веретена, що зумовлює виникнення біопотенціалів, частота яких залежить від зміни довжини середньої частини.

Сухожильний орган Гольджі являє собою тонку капсулу всередині сухожилля, що зв'язує 15–20 м'язових волокон (рис. 2.20). Кожний орган має аферентний нерв, який посилає потенціали в центральну нервову систему під час скорочення м'яза. Орган Гольджі реагує на *напругу*, що виникає в сухожиллі. Частота

посилання потенціалів пропорційна напрузі, що виникає в сухожиллі.



Рис. 2.20. Сухожилльний орган Гольджі

*Вісцеральні рецептори* постачають інформацію про рух або стан внутрішніх органів (шлунку, кишечника, сечового міхура), а також сигналізують про стан внутрішнього середовища, з яким пов'язані відчуття голоду (рівень цукру в крові) або спраги (підвищення осмотичного тиску в плазмі крові)

Таким чином, всі механорецептори відрізняються не тільки будовою, але й здатністю реагувати на різні механічні стимули. Механорецептори, розміщені поблизу поверхні шкіри (наприклад, тільця Мейснера), реагують на такі механічні стимули як стиск, вигин, розтяг. Такі утворення виконують функції рецепторів *дотику*. Механорецептори в глибині шкіри (наприклад, тільця Пачіні), реагують на *зміну тиску*. Механорецептори опорно-рухового апарату (*інтерорецептори*) дають інформацію про *зміну довжини м'язів або напруги*, що виникають у них. Вестибулорецептори реагують на *лінійне або обертальне прискорення*.

#### Механорецепція у риб

Сприймання рибами зовнішніх механічних факторів та реакція на них здійснюється за допомогою особливих структур, а саме: ампул Лоренціні, пухирців Саві та власне сейсмочувствительних органів (каналів, борозенок), що містять рецепторні елементи — *невромасти* або *сейсмочувствительні пупки*. До застарілих слід віднести терміни «бокова лінія», «органи бокової лінії». Вздовж тіла більшості риб, а також на голові розміщена сей-

смочувствительна система, що являє собою послідовність каналів, відкритих через певний проміжок для води. Складаються ці канали з в'язких, желатинових конусоподібних структур (*cupulae*), які містять волоски, зв'язані з чутливими клітинами (*neuromasts*). До кожної такої клітини підходить нервовоє закінчення (рис. 2.21). Потік води, що рухається, викликає деформацію волосків, що зумовлює утворення електричних потенціалів та їх передачу у нервову систему. Такі сейсмочувствительні системи здатні реагувати на миттєві зміщення води, забезпечують інформа-



цією щодо напрямку сенсорної системи риб руху водних потоків та наявності турбулентних течій, викликаних присутніми у водному середовищі членів зграї або ворогів.

#### Механорецепція у бджіл

Механорецептори бджол реагують на механічні деформації певної своєї частини під час дотику або контакту з твердим субстратом, впливу потоку повітря, або виступають як пропріорецептори, реагуючи на деформації або напругу м'язів та зовнішнього скелета. Розміщені механорецептори бджол на вусах, ротових придатках, кінцівках, поверхні черевця. Чутливими елементами механорецепторів є сенсили, а саме: *sensilla trichodea*, *s.scolopophora*, *s.campaniformia*, *s.schaeftica*. Трихоїдні сенсили (*s.trichodea*), що виконують функції *рецепторів дотику*, складаються з двох частин — спеціалізованого кутикулярного утворення (волоска) і нервового закінчення, що перебуває в контакті з цим

утворенням (рис. 2.22). Подразнення волоска передається розміщеній біля його основи нервовій клітині і

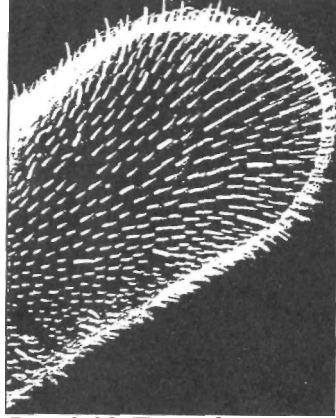


Рис. 2.22. Трихoidна сенсила як рецептор дотику

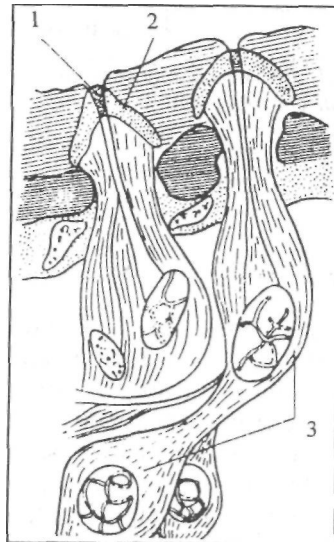


Рис. 2.23. Пропріорецептор пружних деформацій кутикули: 1 — заломлююче тьмя; 2 — кутикулярний шар; 3 — чутлива нервова клітина

через її відростки потрапляє до центральної нервової системи. Розміщені трихoidні сенсили по всьому тілу бджоли. За допомогою таких сенсил, розміщених на антенах, бджола має можливість виявляти й аналізувати мікрорельєфи на поверхні квітів. Розміри сенсиль (близько 10 мкм) такі самі, як і розміри цих мікрорельєфів, що можуть трішки змінюватися від краю квітки до центру; аналіз цих змін дає інформацію відносно розташування нектару. Трихoidні сенсили, розміщені у місці зчленування голови та грудей, виконують також функції *гравіорецепторів*. Тиск голови на груди залежить від положення голови бджоли щодо тіла; реєструючи рівень тиску за допомогою волосків, бджола спроможна контролювати положення у просторі свого тіла, а також вимірювати кути шестикутних чарунк при їх побудові. Реакція бджоли на механічні напруження та деформації відбувається завдяки сенсилам, розміщеним на голові та кінцівках (*s.scolophora*), а також на гострому кінці жала (*s.campaniformia*). На відміну від

трихoidних ці сенсили спеціалізуються як *пропріорецептори пружних деформацій* кутикули. Розміщені по лініях деформацій, вони передають сигнали щодо інтенсивності та напрямку вигинів кутикули. Морфологічно вони відрізняються від трихoidних сенсил, бо не мають волоска, перетвореного тут у невеликий овальний ковпачок, до якого підходить дзвоноподібний кінцевий відросток чутливої клітини (рис. 2.23). Дзвоноподібні сенсили у робочій бджолі містяться на крилах (1510), кінцівках (450), жалі (100); у маток — на крилах (1310) і кінцівках (450); у трутнів — на крилах (1998) і кінцівках (606). Зміна натягу кутикули біля сенсиль зумовлює або зменшення, або збільшення кривизни кутикулярного купола.

Ще одна спеціалізована форма механорецепторів — *джонстонів орган* (*s.schaetica*), розміщений на другому членику антени. Стимуляція цього органу відбувається під час обмацування антенами різних предметів та руху бджоли у повітрі.

## АКУСТИЧНІ ФАКТОРИ

### Пружні коливання та хвилі

*Пружним* називається середовище, деформації якого, зумовлені зовнішніми впливами, зникають після припинення цих впливів. Процес поширення коливань у суцільному середовищі називається *хвильовим процесом* або *хвилею*. Механічні збурення (деформації), що поширюються в пружному середовищі, називаються *пружними* (або *механічними*) *хвилями*. Пружні хвилі бувають *поzdовжніми*, якщо частинки середовища коливаються у напрямку поширення хвилі, і *поперечними*, якщо частинки середовища коливаються в площинах, перпендикулярних напрямку поширення хвилі. Пружна хвиля називається *гармонічною*, якщо відповідні їй коливання частинок середовища є гармонічними.

Пружні хвилі, що мають частоту в діапазоні 20-20000 Гц, називаються *звуковими*; з частотами > 20000 Гц — *ультразвуковими* і < 20 Гц — *інфразвуковими*. Шкалу механічних коливань, що складається із

звукових, ультразвукових та інфразвукових коливань, наведено на рис. 2.24.

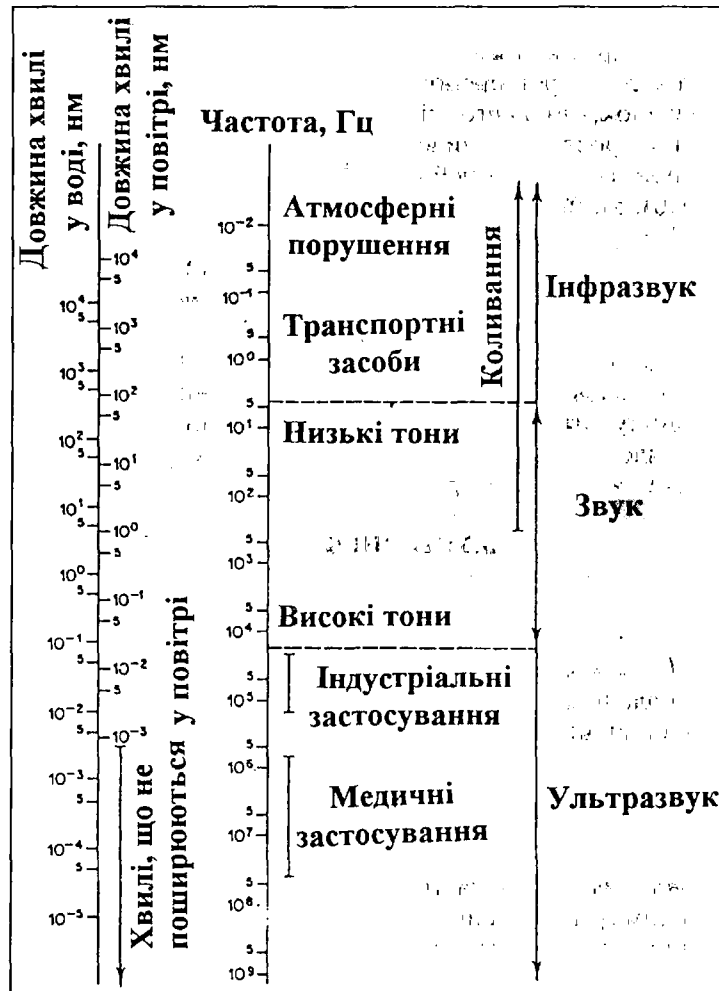


Рис. 2.24. Шкала коливань звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів

Галузь фізики, яка досліджує пружні коливання та хвилі звукового, ультразвукового та інфразвукового діапазонів, процеси їх збудження та поширення, взає-

модію їх з речовиною та різноманітні застосування, називається *акустикою*.

### Характеристики звукових коливань

Рівняння звукової хвилі має вигляд:

$$y = y_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\Lambda}\right) = y_{\max} \sin 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{V}\right) = y_{\max} \sin \Omega \left(t - \frac{x}{V}\right), \quad (2.17)$$

де  $y_{\max}$  — максимальне зміщення молекул середовища, в якому поширюється звукова хвиля;  $T$  — період коливань;  $x$  — відстань, що вимірюється вздовж напрямку поширення хвилі;  $\Lambda$  — довжина звукової хвилі;  $V$  — швидкість поширення звукової хвилі;  $t$  — час;  $\nu$  — частота звукової хвилі;  $\Omega$  — колова частота звукової хвилі.

*Кінетична енергія*, що переноситься молекулами середовища, які коливаються, визначається виразом:

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2, \quad (2.18)$$

де  $m$  — маса молекул;  $V$  — миттєва швидкість.

З урахуванням того, що  $V = \frac{dy}{dt}$ , можна отримати таке рівняння:

$$E_k = 2\pi^2 m y_{\max}^2 \nu^2 \left[ \cos 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{V}\right) \right]^2. \quad (2.19)$$

Максимального значення кінетична енергія набуде, коли  $\cos 2\pi \nu \left(t - \frac{x}{V}\right) = 1$ , тобто:

$$E_{k \max} = 2\pi^2 m y_{\max}^2 \nu^2 = \Omega^2 y_{\max}^2 m. \quad (2.20)$$

Об'ємна густина енергії дорівнює:

$$E_{K\max}/V = 2\pi^2\rho v^2 y_{\max}^2 V = \Omega^2 \rho y_{\max}^2 V, \quad (2.21)$$

де  $\rho$  — густина середовища, в якому поширюється звукова хвиля;  $V$  — об'єм.

Повна енергія, що переноситься звуковою хвилею, визначається як:

$$E_{K\max} = 2\pi^2\rho v^2 y_{\max}^2 V. \quad (2.22)$$

Акустична потужність  $P$ , що переноситься звуковим імпульсом тривалістю  $t$ , визначається як:

$$P = E_{K\max} / t, \quad (2.23)$$

а інтенсивність  $I$  звукової хвилі :

$$I = \frac{P}{S} = E_{K\max} / St. \quad (2.24)$$

### 2.3. Основні акустичні параметри повітря і води

Речовина	Густина $\rho$ , кг · м <sup>-3</sup>	Швидкість звуку $V$ , м · с <sup>-1</sup>	Питомий хвильовий опір $\rho V$ , кг · м <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>
Повітря	1,29	$0,331 \cdot 10^3$	427
Вода	$1 \cdot 10^3$	$1,497 \cdot 10^3$	$1,497 \cdot 10^6$

Звуковим (або акустичним) тиском  $p_a$  називають додатковий тиск (надлишковий над середнім тиском навколишнього середовища), що утворюється в ділянках згущення частинок в акустичній хвилі:

$$p_a = \Omega \rho V y_0, \quad (2.25)$$

де  $\Omega$  — колова частота;  $y_0$  — амплітуда зміщення частинки, що коливається;

$\rho V$  — питомий хвильовий опір середовища.

Звуковий тиск пов'язаний з інтенсивністю хвилі:

$$I = p_a / 2 \rho V. \quad (2.26)$$

Основні акустичні параметри повітря й води наведено в табл. 2.3.

Рівень інтенсивності звуку  $L$  оцінюється як:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (2.27)$$

де  $I_0$  — мінімальна інтенсивність (для повітря —  $10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ). Тут  $L$  вимірюється в децибелах (дБ). Типові значення рівня інтенсивності звуку наведено в табл. 2.4.

### 2.4. Типові значення рівня інтенсивності звуку

Джерело звуку	Рівень інтенсивності, дБ
Пошкодження барабанної перетинки	160
Поріг болісних відчуттів	130
Постріл із рушниці	100
Автомобільний сигнал на відстані 6 км	90
Міська вулиця	75
Розмова	55
Шум у кімнаті	40
Відкрита місцевість	10

#### Суб'єктивні характеристики звукових хвиль

Звук, що є об'єктом звукових вражень, оцінюється живим організмом суб'єктивно.

Висота звуку відповідає якості звуку, що визначається суб'єктивно на слух і залежить в основному від частоти звукових коливань. Із зростанням частоти висота звуку збільшується і — навпаки. Значно менше висота звуку залежить від його інтенсивності і складності.

Гучність звуку — це величина, що характеризує слухові відчуття для даного звуку. Гучність звуку складним чином залежить від інтенсивності звуку, акустичного тиску, частоти і форми звукових коливань.

*Тембр звуку* визначається спектральним складом звуку, тобто інтенсивністю і частотою обертонів відносно основного тону.

#### *Характеристики ультразвукових коливань*

Пружні хвилі з частотами від  $2 \cdot 10^4$  Гц до  $10^9$  Гц називаються *ультразвуком*. До основних особливостей ультразвуку належить його властивість поширюватись по прямій, що дає змогу розглядати цей процес з позицій геометричної акустики (відбивання, заломлення, фокусування). Оскільки густина потоку енергії пропорційна квадрату частоти, ультразвукові хвилі характеризуються великою енергією.

#### *Вплив ультразвуку на біологічні об'єкти*

*Механічні ефекти* зумовлюються періодичними коливаннями частинок середовища з частотою ультразвукової хвилі. Загальні коливання макромолекулярних чи мембранних структур можуть спричинити їх утому або пошкодження. Найзначнішим механічним фактором, що індукується ультразвуковим випромінюванням, є сили зсуву та ударні хвилі. Ультразвукова хвиля, поширювана в рідині, викликає періодичні її стискування й розрідження, що можуть призвести до розриву рідини та утворення бульбашок, заповнених парою цієї рідини. Це явище називається *кавітацією*. Ще один механічний фактор, зумовлений ультразвуковим випромінюванням, пов'язаний з виникненням локальних тисків. Цей ефект особливо помітний при відбиванні ультразвукової хвилі від будь-яких структур і утворенні так званої *стоячої хвилі*, яка призводить до порушення функціонування певних ділянок організму (наприклад, до блокади дрібних капілярів згустками еритроцитів).

*Теплові ефекти* пов'язані з процесом поглинання тканиною ультразвукового випромінювання, внаслідок чого їй передається частина енергії. Поглинута енергія перетворюється у теплоту і спричиняє підвищення температури тканини. Крім того, на підвищення тем-

ператури тканини впливають її розміри, інтенсивність і частота ультразвукового випромінювання, тривалість опромінювання.

*Фізико-хімічні ефекти* зумовлені зміною проникності біологічних мембран і дифузійних процесів. Під впливом ультразвукових коливань у біологічних тканинах можливі зміни концентрації водневих іонів; встановлено вплив ультразвуку на високомолекулярні сполуки: ферменти, гормони, вітаміни. Ультразвук сприяє вивільненню з органів і тканин біологічно активних речовин.

#### *Вплив інфразвуку на живі організми*

Биття серця, коливання легень, робота кишечника, вібрації голосових зв'язок — усе це супроводжується генерацією інфразвуку. У природі джерелами інфразвуку є рослини і дерева, що коливаються, мікросейсмічні коливання земної поверхні, землетруси, урагани, вулканічні виверження, шторми, грозові розряди. В індустріалізованому суспільстві до джерел інфразвуку слід віднести автомобільні, корабельні, авіаційні та ракетні двигуни. Інфразвукові коливання з рівнем інтенсивності  $< 120$  дБ вважаються помірними, більше — інтенсивними.

Основним наслідком впливу інфразвуку на живий організм є порушення органів балансу, а саме — вестибулярного апарата. Для дослідження впливу інфразвуку на людину або тварину використовували спеціальні генератори та гучномовці, що працювали в діапазоні  $K200$  Гц з рівнем інтенсивності до 146 дБ. Оцінку впливу інфразвуку здійснювали за реєстрації характеру й інтенсивності обертання очних яблук пацієнта, що оберталися у протилежних напрямках з частотою  $0,7\text{н}-1,5\text{с}^{-1}$ . Цей періодичний рух під назвою *ністагм* свідчить про порушення вестибулярного апарата. Реєстрацію ністагму здійснюють через вимірювання корнеально-ретинового потенціалу; техніка вимірювання цього потенціалу називається *електро-ністагмографією*. Ністагматична реакція організму залежить від інтенсивності інфразвукового стимулу і



тривалості дії його на організм, а також від частоти інфразвукових коливань.

Можливим механізмом впливу інфразвуку на живі організми слід вважати зміщення перілімфи - рідини, що заповнює внутрішнє вухо, завдяки періодичним змінам тиску, що передаються цій рідині через овальне віконце. У свою чергу, зміщення перілімфи призводять до деформації волоскових клітин. Психологічний вплив інфразвуку пов'язаний з такими явищами як сонливість, летаргія, почуття жаху або боязні.

Інфразвук значної інтенсивності здатний спричиняти зміни слухової чутливості, відгук барабанної перетинки, болісні відчуття, утруднення мовлення і модуляції голосу, порушення респіраторної активності, зміни  $\alpha$ -ритмів мозку.

## БІОАКУСТИКА

Розділ біофізики, що вивчає процеси утворення звуків живими істотами за допомогою голосової системи або стридуляційного апарата, звукову сигналізацію та спілкування тварин (біокомунікацію) в природі, їх орієнтацію у просторі за допомогою ехолокаторів, називається *біоакустикою*.

### Утворення звуків тваринами

*Ссавці*. Первинним джерелом звукових коливань у високорозвинених тварин є гортань і пов'язані з нею голосові зв'язки, еластичні м'язові волокна яких можуть вібрувати. Звукові хвилі утворюються за допомогою коливальних структур, які у тварин характеризуються певними розмірами і частотним діапазоном м'язових скорочень. Більшість м'язів тварин, незважаючи на їх різноманіття, не спроможні коливатися з частотою, що перевищує  $10^3$  Гц. У ссавців звуки утворюються верхньою гортанню, що являє собою хрящову трубку. Повітря, що проходить через цю трубку, примушує коливатися голосові зв'язки, розміщені у верхній частині гортані. Залежно від анатомічних особливостей голосового апарата тварини створюються

коливання різної інтенсивності, частоти, тембру, часових інтервалів. Від цих характеристик залежать звуки, що утворюються свійськими тваринами: іржання, мукання, рохкання, мекання.

*Птахи*. В гортані, яка перетворює кінетичну енергію повітря, що рухається, в енергію звукової хвилі, міститься дві голосових мембрани. Під час проходження повітря між мембранами з великою швидкістю статичний тиск згідно з рівнянням Бернуллі зменшується і мембрани сходяться; отвір при цьому закривається, швидкість руху повітря зменшується і статичний тиск зростає. Процес повторюється, завдяки чому виникають звукові сигнали, частота яких у птахів перебуває в діапазоні від 200 Гц до 12 кГц.

*Риби*. Механізми утворення звуків рибами різні: вони можуть виникати за рахунок стридуляції — взаємного тертя різних частин тіла, наприклад, складових частин ротового апарата в процесі харчування; гідродинамічної дії — утворення звуків під час плавання; взаємодії спеціалізованих м'язів з плавальним міхуром. Структуру м'язів з вузькими борозенками, що взаємодіють з плавальним міхуром у риб *Eutrigla gurnadus* (*Triglidae*), наведено на рис. 2.25. Спектральний діапазон звукових коливань риб становить від 20+50 Гц до 10+12 кГц.

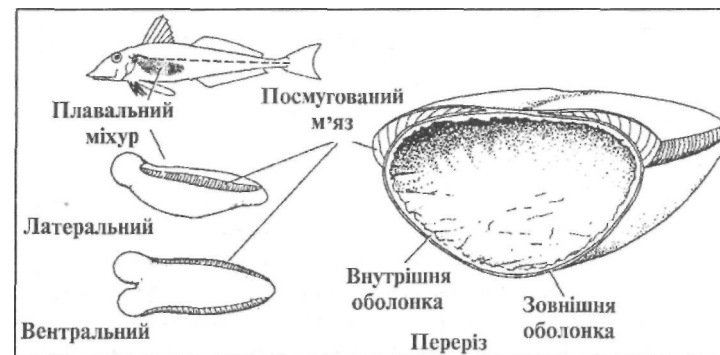


Рис. 2.25. Структура м'язів, обладнаних вузькими борозенками, що взаємодіють з плавальним міхуром

*Комахи*. Багато тварин настільки малих розмірів, що утворювати звуки завдяки тільки м'язовим волокнам

вони практично не здатні, а роблять це за допомогою стридуляційного апарата. Незважаючи на різні анатомічні властивості стридуляційних апаратів, принципи їх дії майже однакові. Стрекоотальний кантик, розміщений в одній частині апарата, рухається вздовж стрекотальної жилки, що має періодичну структуру. Розміри елементів цієї структури — в межах кількох мікрометрів. Протягом кожного м'язового скорочення кантик зачіпає сотні елементів жилки, утворюючи при цьому звуку високої частоти.

*Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку у навколишньому середовищі*

Серед основних процесів, що характеризують взаємодію звукових хвиль з навколишнім середовищем, слід назвати поглинання, послаблення, відбивання, заломлення, дифракцію, розсіювання.

*Послаблення звуку* супроводжується зменшенням звукового тиску із збільшенням відстані до джерела звуку. Залежно від структури звукового випромінювача тварини послаблення звуку при збільшенні відстані вдвоє становить 6-12 дБ.

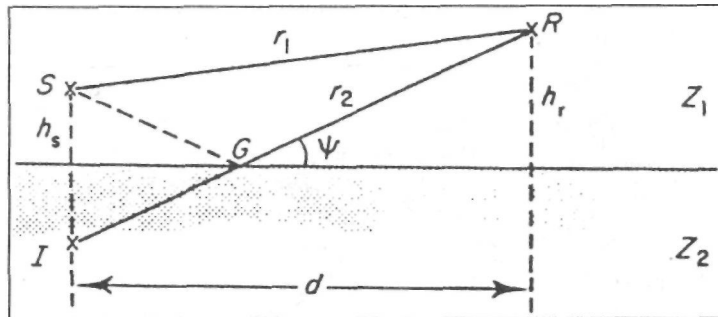


Рис. 2.26. Процес інтерференції звукових хвиль:  $S$  — джерело звуку;  $R$  — приймач звуку;  $h$  — висота розташування джерела звуку;  $A$  — висота розташування приймача звуку;  $Z_1$  — повітря;  $Z_2$  — ґрунт;  $r_1$  — відстань, що проходить звукова хвиля у повітрі;  $r_2$  — відстань, що проходить звукова хвиля до і після відбивання від земної поверхні;  $d$  — відстань між джерелом та приймачем звуку;  $180^\circ - \psi$  — кут відбивання;  $G$  — точка падіння звукової хвилі на земну поверхню

*Відбивання звуку* відбувається тоді, коли розміри навколишніх поверхонь значно перевищують довжину звукової хвилі і розміри нерівностей поверхні менші за довжину звукової хвилі. Процес відбивання звуку реалізується на межах розподілу «повітря-ґрунт», «повітря-вода», а також між шарами повітря різної температури або вологості. Під час утворення звуків тваринами може відбуватися взаємодія звукових хвиль: одна з них поширюється безпосередньо між випромінювачем і приймачем, інша відбивається від поверхні землі (рис. 2.26). Завдяки інтерференції ці дві хвилі компенсують одна одну, оскільки відбита хвиля змінює свою фазу. Для запобігання процесу інтерференції тварина мусить підійматися над земною поверхнею. Наприклад, цвіркуни здатні чути один одного на відстані в кілька метрів на поверхні ґрунту; ця відстань збільшується до 50 м, якщо комахи підіймаються над поверхнею.

*Поглинання звуку* пов'язане з переходом звукової енергії у теплову та поширенням звуку в інші середовища. У повітрі і воді швидше згасають височастотні звукові сигнали; крім того, на поглинання звуку впливають температура й вологість повітря.

*Заломлення звуку* зумовлюється різкими або поступовими змінами швидкості поширення звукової хвилі, що залежать від температури та густини середовища. В сонячний день температура повітря знижується з відстанню від земної поверхні, так само — як і швидкість поширення звуку. Це спричиняє заломлення звукової хвилі догори. Вночі ситуація змінюється і звук «знаходить» канали поширення вздовж земної поверхні.

*Дифракція або розсіювання звуку* пов'язані із зміною напрямку поширення звукової хвилі під час її взаємодії з об'єктами. Якщо розміри об'єкта сумірні з довжиною хвилі, відбувається огинання об'єкта (дифракція) або зміна траєкторії поширення хвилі (розсіювання). Такі процеси характерні для поширення звуку крізь рослинні покриви.

### Поширення звуків у водному середовищі

У воді звук поширюється не так, як у повітрі. Низькочастотні звукові сигнали тут під час поширення менше розсіюються або поглинаються, завдяки чому передаються на значну відстань. Наприклад, низькочастотні звуки, утворювані китом *Balaenoptera physalus*, можна чути на відстані у кілька десятків кілометрів.

Акустичні характеристики води й повітря значно різняться; через це зміщення частинок води і швидкість цього зміщення тут приблизно в 3600 разів менші, ніж у повітрі. Саме тому межа розподілу «повітря—вода» відіграє роль своєрідного рефлектора звукових коливань. Наявність таких меж має важливе значення

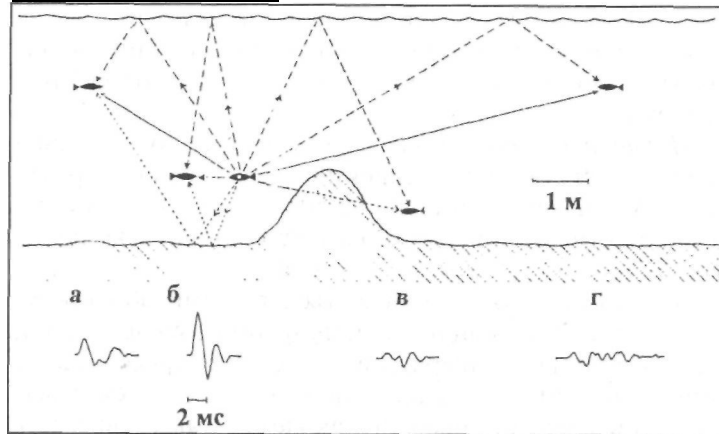


Рис. 2.27. Структура звукових хвиль у процесі їх поширення та взаємодії з навколишнім середовищем

для акустичної комунікації водних організмів. На рис. 2.27 наведено структуру акустичних сигналів, що реєструються водними мешканцями безпосередньо від джерела звуку і після відбиття від межі розподілу.

### Акустична комунікація тварин

Всі акустичні сигнали, що утворюються птахами, можна поділити на дві основних групи — *заклики* і *співи*. Заклик можна уявити як елемент більш складного акустичного сигналу — співу. Залежність частоти

й інтенсивності звукових сигналів, утворюваних птахами, від часу називають *сонограмами*.

Пташині заклики відрізняються за змістом. Можливі варіації закликів двох видів птахів наведено на рис. 2.28. Тут за-

клики *a—d* використовуються для позначення території та відлякування інших самців — представників цього виду. Якщо птах сполоханий, він утворює звуки тривоги *e—f*. Звуки *g—k* призначені для налагодження контакту з родичем; звуки *l—m* використовуються під час холодної погоди, щоб зібрати представників виду для сумісного сну; звуки *n—o* є сигналами до годівлі пташенят, що спонукають останніх відкрити рота; звуки *p—q* закликають пташенят до сну. Крім того, є заклики, використовувані для запрошення птахів до годівниці, у процесі висиджування, для впізнавання пташенят (якщо птахи живуть у колоніях), під час міграції тощо.

Співи птахів виконують подвійну функцію. По-перше, вони інформують про належність тій чи іншій особині або парі певної території і запобігають вторгненню небажаних візитерів. По-друге, привертають увагу статевого партнера. У деяких видів птахів вокальний дует допомагає налагодити тісний контакт між членами пари і синхронізувати взаємну поведінку в часі. На рис. 2.29 наведено сонограми співів птахів — представників різних видів одного роду (*вівчариків*). Видно, що всі три сонограми значно відрізняються.

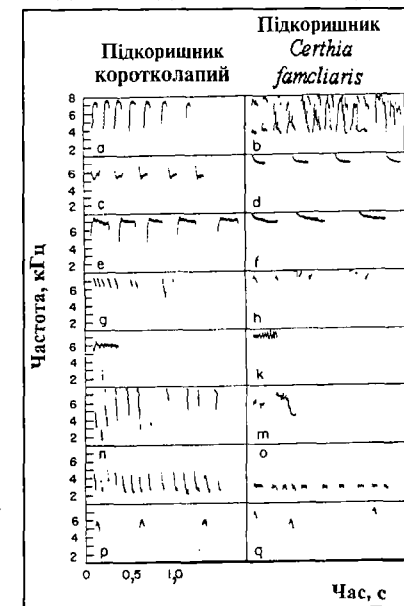


Рис. 2.28. Можливі варіації закликів двох видів птахів (пояснення в тексті)

Характеристики цих сонограм можуть бути використані як таксономічні критерії.

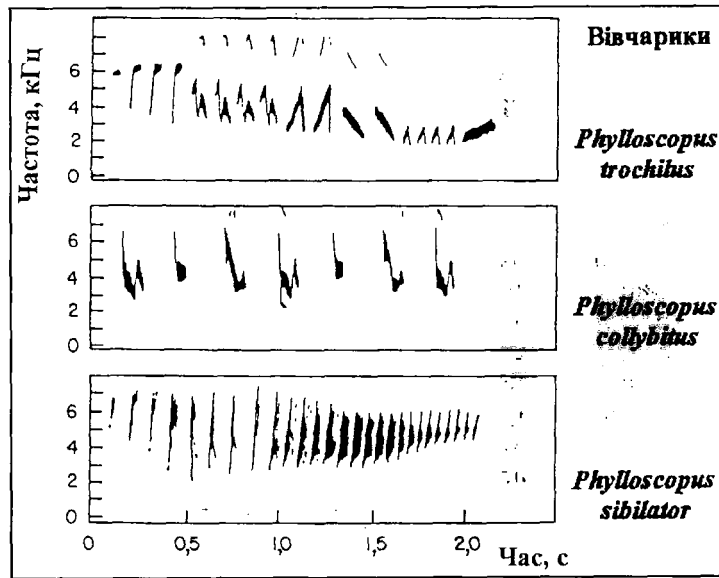


рис. 2.29. Сонограми співів птахів — представників різних видів одного роду (вівчариків)

Акустичні сигнали, утворювані птахами, відрізняються за інтенсивністю, частотою, тривалістю. Птахи — представники певного виду — впізнають один одного завдяки *амплітудній модуляції*, що полягає в зміні інтенсивності акустичного сигналу в часі, та *частотній модуляції* — зміні частоти акустичних сигналів.

Акустичні сигнали риб поділяються на харчові, нерестові, агресивно-оборонні, групові і пов'язані з турботою про нащадків. Стридуляційні звуки нагадують скрегіт і скрипіння; частота їх — від 20 Гц до 12 кГц. Гідродинамічні звуки складаються з низькочастотних сигналів (20 Гц-5 кГц), утворюваних за допомогою руху плавників і тіла риби, і високочастотних — за допомогою внутрішніх органів. Частота звуків, що виникають за взаємодії м'язів з плавальним міхуром, мають частоту 40 Гц-2,5 кГц і являють собою серію імпульсів.

Бджоли у процесі спілкування утворюють звуки, зумовлені діяльністю крилових пластин та тораксу. Спектр звуків бджоли — в межах 8-12 кГц, де можна виділити три максимуми — 75-190 Гц, 210-400 Гц і 450-550 Гц. Інтенсивність і спектральне положення цих максимумів залежить від рівня вентиляції, пори року, температури, наявності корму. Одержано відомості, що бджоли здатні створювати ультразвукові (20-22 кГц) коливання, в яких, можливо, беруть участь високочастотні гармоніки або вихрові потоки, що виникають під час польоту бджоли. Звукові сигнали бджоли використовують для повідомлення членам сім'ї про виявлення корму. Звуки, що їх утворюють бджоли під час своєрідного танку, містять інформацію про відстань до корму. Тривалість звукового посилання, паузи між посиланнями, частота проходження посилання і кількість коливань у ньому залежать від відстані до годівниці. Крім того, структура акустичного сигналу специфічна для бджіл - представниць різних рас. У період роїння бджоли також обмінюються звуковою інформацією, закладеною у спектральному складі акустичних сигналів: так, звукові сигнали, що сповіщають про можливе злітання, являють собою поодинокі імпульси з максимумом 300-660 Гц; рій, що вилетів з вулика і літає перед ним, утворює інтенсивні звуки, в спектрі яких є два максимуми — при 185-265 Гц і 430-510 Гц.

## АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ

### Акусторецепція у ссавців

Слуховий аналізатор людини і високорозвинених тварин складається з зовнішнього, середнього і внутрішнього вух, зв'язаних з центральною слуховою нервовою системою.

*Зовнішнє вухо* складається з *вушної раковини* (звукословлювача) і *слухового проходу*. Вушна раковина є рупором, що спрямовує звукові коливання в слуховий прохід. У багатьох тварин (коней, кіз тощо) вушні раковини рухомі; завдяки скороченню м'язів тварина

обертає вушні раковини відносно поздовжньої осі, нахилає їх уперед, назад, убік з тим, щоб спрямувати раковини у бік розташування джерел звуків і забезпечити краще їх сприймання. Функції зовнішнього вуха полягають в оптимізації та посиленні найважливіших звукових частот, що має сенс з точки зору комунікації живих істот між собою та їх виживання. У просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом, формується стояча хвиля (рис. 2.30). При рівності довжи-

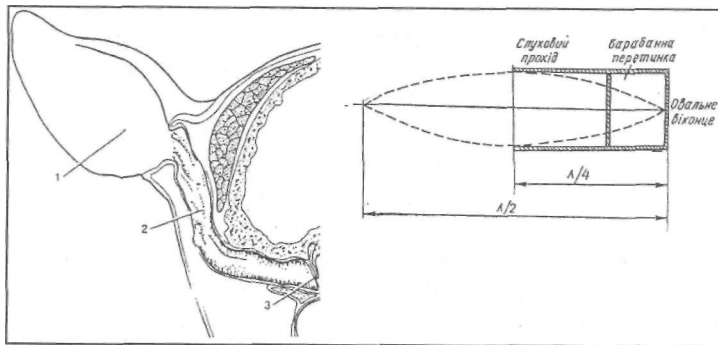


Рис. 2.30. Формування стоячої хвилі у просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом: 1 — вушна раковина; 2 — слуховий прохід; 3 — барабанна перетинка

ни цього простору чверті довжини хвилі звуку виникає резонанс — відносно великий селективний (вибірний) відгук коливальної системи на періодичний вплив з частотою, близькою до частоти її власних коливань. Під час резонансу відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань системи. Максимальна чутливість слухового аналізатора проявляється саме до резонансних частот.

Середнє вухо тварини, відмежоване від зовнішнього барабанною перетинкою, складається з барабанної порожнини, слухових кісточок (молоточка, коваделка і стремінця) та слухової труби. Функції середнього вуха обмежуються передачею звукових коливань від зовнішнього середовища до ендолімфи, посиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів. Процес посилення реалізується завдяки збільшенню тиску, що пов'язано

з різницею площі барабанної перетинки і овального віконця, що зв'язане з стремінцем і відмежовує середнє вухо від внутрішнього; різниця у тиску становить близько 20-25 разів. Крім того, кістчковий апарат виконує функції важеля, що забезпечує вигравш у силі приблизно в 2,5 раза (рис. 2.31). Загальний рівень посилення звукових коливань середнім вухом становить, таким чином, близько 50-60 разів.

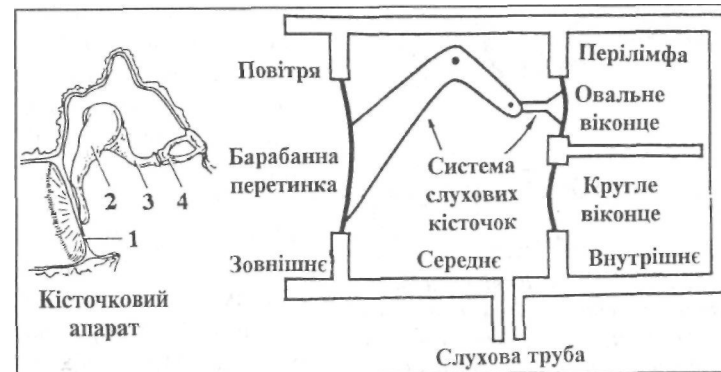


Рис. 2.31. Кістчковий апарат середнього вуха та модель, що пояснює функціонування середнього вуха: 1 — барабанна перетинка, 2 — молоточок, 3 — коваделка, 4 — стремінець

Внутрішнє вухо складається з трьох спіральних каналів — вестибулярного, середнього і барабанного. Середній канал відокремлений від вестибулярного мембраною Рейснера, а від барабанного — базиллярною мембраною. На проксимальному кінці барабанного каналу міститься кругле віконце, що виконує функції демпфера. Акусторецепторами є волоскові клітини, зв'язані з базиллярною мембраною й оснащені війками

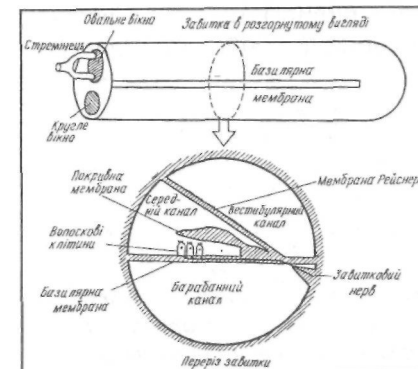


Рис. 2.32. Будова внутрішнього вуха (завитка в розгорнутому вигляді) та переріз завитки

з базиллярною мембраною й оснащені війками

(рис. 2.32). Базиллярна і покривна мембрани, волоскові клітини, з'єднані з *нервовими волокнами*, утворюють *кортів орган*. Функції внутрішнього вуха полягають в частотному аналізі звукових сигналів. Згідно з сучасним уявленням, коливання, збуджені стремінцем в овальному віконці, викликають хвильові рухи базиллярної мембрани у вигляді *біжучої хвилі* (рис. 2.33).

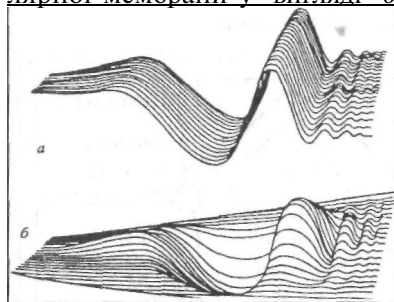


Рис. 2.33. а. Хвильові рухи базиллярної мембрани у вигляді біжучої хвилі, що поширюється вздовж мембрани; б. Більш реальна ситуація, коли біжуча хвиля поширюється як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках

розташування максимуму біжучої хвилі залежить від частоти звукового сигналу: низькі частоти стимулюють верхівкові ділянки мембрани, високі — її основу. Зміщення базиллярної мембрани передаються волосковим клітинам, над якими розташована покривна мембрана. При деформації базиллярної мембрани покривна мембрана також починає рухатися, але завдяки різним системам закріплення обох мембран (дві точки опори у базиллярній і одна — у покривній) на війки волоскових клітин діє з боку покривної мембрани сила зміщення (рис. 2.34); вигин

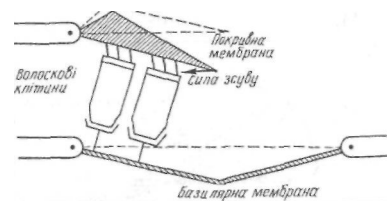


Рис. 2.34. Виникнення сили зсуву, що діє на волоскові клітини, за рахунок покривної та базиллярної мембран

війок призводить до збудження зв'язаних з волосковими клітинами волокон слухового нерва. Автору теорії біжучої хвилі Георгу фон Бекеші було присудже-

но 1961 р. Нобелівську премію. Таким чином, звукова хвиля викликає коливання бази-

лярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. Завдяки цьому відбувається

локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органа залежно від частоти звукового сигналу.

### Акусторецепція у птахів

Слух відіграє значну роль у повсякденному житті птахів під час їх відпочинку або насиджування. Крім того, слух виконує важливі функції за комунікації на великих відстанях у місцях з обмеженою видимістю. Особливий інтерес становлять співучі птахи у зв'язку зі складністю і важливістю їх акустичних комунікаційних систем. Птахам, що ведуть нічний спосіб життя (наприклад, совам), притаманна надзвичайно висока слухова чутливість; у той же час комунікаційний репертуар їх відносно примітивний.

Слуховий апарат птахів відмінний від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо у них — короткий, широкий і складний за конфігурацією слуховий канал, що веде до барабанної перетинки. У багатьох птахів зовнішня частина слухового каналу оточена спеціальним пір'ям, що утворює своєрідне заглиблення, яке виконує функції ефективного звукового колектора. Особливо розвинені такі заглиблення параболічної форми у сов. Середнє вухо складається з довгої тонкої кістки, що з'єднує барабанну перетинку з овальним віконцем. Внутрішнє вухо складається з короткої вигнутої завитки, довжина якої становить 4-10 мм.

Птахи здатні відрізнити амплітудно- та частотно-модульовані акустичні сигнали. Так, канарка в змозі розрізнити рівні інтенсивності звуку в 1,5 дБ, тоді як голуб — в 3 дБ. Варта подиву здатність птахів реагувати на незначні зміни частоти акустичних сигналів: частоти, з якими починають і закінчують своє акустичне спілкування птахи, становлять 10 Гц в межах 500 Гц та близько 20 Гц в межах 1-2 кГц. Діапазон чутливості і здатність розрізнити високі тони у птахів кращі, ніж у нижчих тварин.

### Акусторецепція у риби

Згідно із загальноприйнятими поглядами, слухову функцію у риби виконує орган рівноваги — *лабіринт*, зокрема його нижня частина (*Lagena* та *Sacculus*). Основним акусторецептором риби є отолітовий орган, що складається з отолітів і волоскових клітин (рис. 2.35). Звукові хвилі проходять крізь тіло риби з невеликим опором і зумовлюють рух волоскових клітин. Оскільки отоліти мають більшу густину, ніж вода і тканини риби, реакція отолітів і волоскових клітин на звукові коливання відрізняється. Через різницю рухів отолітів і волоскових клітин відбувається деформація останніх, завдяки чому в мозок надходить інформація щодо навколишньої звукової ситуації.

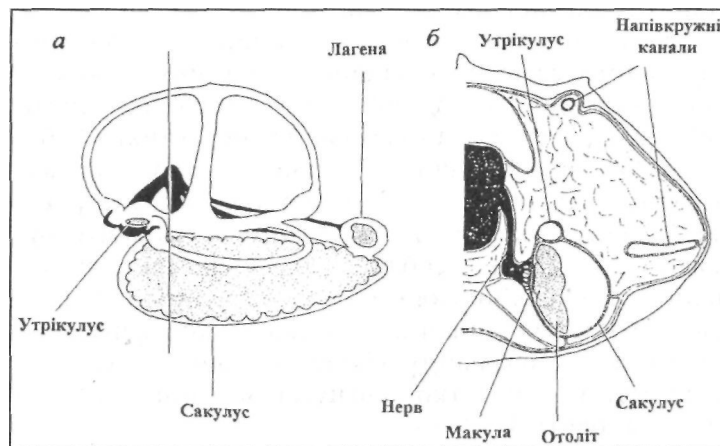


Рис. 2.35. Акусторецептор у риби: а. Система трьох ортогональних напівкруглих каналів; б. Перетин черепа на рівні переднього сакулуса

Розрізняють два типи слухових аналізаторів у риби — пов'язаних і не пов'язаних із плавальним міхуром. Так, у кісткових риби плавальний міхур багатфункціональний — за допомогою його риба відчуває гідростатичний тиск, підтримує рівновагу, утворює звуки, дихає. Плавальний міхур здатний розширюватися і скорочуватися у відповідь на звукові хвилі і передавати звукову інформацію через модифіковані хребці (чоти-

ри пари рухомо з'єднаних кісточок) внутрішньому вуху (рис. 2.36). Така кісточкова система отримала назву *Веберового апарата*. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, настроєного на звукові сигнали певної частоти, забезпечуючи їх посилення. Риби, які не мають плавального міхура, використовують для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, зв'язані з внутрішнім ву-

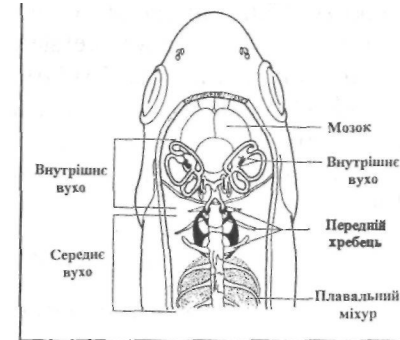


Рис. 2.36. Акусторецептор у кісткової риби. Важливу роль у нових риби (пояснення в тексті) сприйнятті звуку відіграє сейсмо сенсорна система з точки зору аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецепції зміщення частинок води.

Спектр сприймання звукових частот, чутливість до звукових коливань, здатність розпізнавати звукові тони у різних видів риби різні. У цілому можна казати про нижню межу 16-М00 Гц та верхню — 488-^8000 Гц. У цьому діапазоні здатність сприймати вищі (4000-^8000 Гц) звукові частоти мають риби, у яких є плавальний міхур і Веберів апарат; їм властива й вища абсолютна чутливість слуху (70 дБ) порівняно з рибами, що не мають плавального міхура (0-^50 дБ).

### Акусторецепція у комах

Бджоли здатні реагувати на коливання частинок повітря та субстрату, на якому вони перебувають, завдяки чутливим органам *sensilla scolopophora*, розміщеним в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок.

Слуховий аналізатор метелика совки складається з розміщеної на грудному боці *тимпанальної мембрани*, за якою — повітряна порожнина, що перетинається зв'язками. Одна з них містить нервові чутливі волокна, що реагують на механічні та акустичні стимули ультразвукової частоти. Це дає можливість метелику

сприймати випромінювання кажана і уникати зустрічі з хижаком.

У бражника слуховий аналізатор розміщений на нижньогубних щупальцях, що мають повітряні порожнини в перших двох сегментах. Межа спектральної чутливості становить 15+170 кГц з максимумом при 20+40 кГц, тобто, теж належить до ультразвукового діапазону.

Тимпанові мембрани мають сарана, цикади, золоточки.

## ШУМ І ВІБРАЦІЇ

### Характеристики шуму

Шум являє собою звукові коливання, миттєва амплітуда яких змінюється несподіваним чином. Величина миттєвої амплітуди шуму описується нормальним (гаусовим) розподілом (рис. 2.37). Якщо середня потужність (сума інтенсивностей всіх гармонік, що складають шум) є величина стала в певному частотному діапазоні, такий шум називають *білим*.

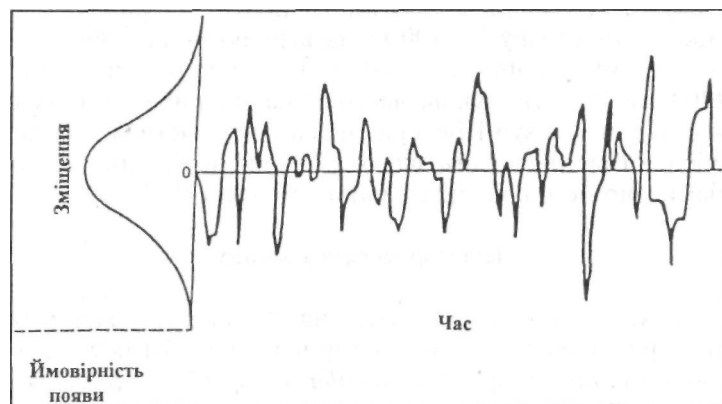


Рис. 2.37. Гаусовий розподіл миттєвої амплітуди шуму

Шум може бути побутовим, виробничим, промисловим, транспортним, авіаційним. Типові значення рівнів інтенсивності шуму та джерел наведено в табл. 2.5а. Рекомендовані норми шуму в приміщеннях і на територіях становлять: 30+35 дБ на територіях заповід-

ників; 34+37 дБ в спальних приміщеннях (будинки, лікарні, квартири); 56+66 дБ в приміщеннях магазинів, заводів тощо.

### 2.5.а. Основні джерела шуму

Джерело	Еквівалентний рівень шуму, дБ
<i>Промислові:</i>	
Газотурбінні енергетичні установки	100+110
Компресорні станції	100
Металургійні заводи	90+100
Будівельні підприємства	90+95
Машинобудівні заводи	80
Друкарні	72+76
<i>Транспортні:</i>	
Автотранспорт (на відстані 7,5 м)	77+83
Легкові, вантажні автомобілі і автобуси	77+83
Залізничний транспорт (на відстані 20 м)	90+101
Авіаційний транспорт (під трасою)	98+105

### 2.5.б. Основні джерела вібрацій

Джерело	Віброшвидкість, мм/с
Рейковий транспорт	0,3+160
Промислові установки	0,05+5
Будівельна техніка	0,002+1,6
Автотранспорт	0,005+0,07
Денний фон у місті	0,006+0,02
Нічний фон у місті	0,003+0,01
Безпечний «геологічний» рівень	0,225
Безпечний фізіологічний рівень	0,12

Шум у 90 дБ спричиняє різноманітні фізіологічні порушення. Верхня межа для людини становить 140 дБ, при 160+170 дБ руйнується барабанна перетинка вуха людини.



### Вимірювання рівнів шуму

Для оцінки рівнів шуму використовують шумоміри і аналізатори шуму. Принцип дії шумоміра полягає в перетворенні звукового тиску в електричний сигнал конденсаторним мікрофоном. Цей сигнал посилюється і калібрується. Типовий діапазон рівнів інтенсивності, оцінюваних шумоміром, становить 30-140 дБ.

### Вплив шуму на живі організми

Шумове забруднення навколишнього середовища стало значною загрозою для здоров'я людини. Протягом дня мешканці великих міст змушені витримувати шумові перевантаження на рівні 65+70 дБ і більше. Є прямий зв'язок між інтоксикацією шумом і серцевими хворобами. У зонах великих аеропортів, де рівень шумів досягає 100 дБ, зріс продаж сноотворних ліків, а діти цих районів гірше засвоюють навчальний матеріал.

Шум може спричиняти розрив барабанної перетинки, бути причиною руйнування органа Корті, оскільки найуразливішими серед усіх елементів слухового аналізатора за дії шуму високої інтенсивності є волоскові клітини внутрішнього вуха. Причому, якщо волоскові клітини зазнають серйозного пошкодження, вони вже не здатні відновлювати свої функції і не можуть бути заміненими іншими клітинами. Наслідком цього може стати часткова або повна втрата слуху.

Для кількісної оцінки впливу шуму на слух застосовують параметр, що характеризує зміну слухової чутливості — *індукований шумом пороговий зсув (ІШПЗ)*, який визначають за вимірювання порогу слухової чутливості до і після дії шуму. Цей зсув може бути тимчасовим або постійним залежно від параметра шуму (інтенсивності, тривалості, частотного складу). Звичайно проміжку часу в чотири хвилини достатньо, щоб визначити характер ІШПЗ у тварин. На рис. 2.38 наведено процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму. Через 2 хвилини крива демонструє зростання в процесі встановлення; лише

через 4 хвилини ця крива наближається до стаціонарного рівня слухової чутливості (5 дБ).

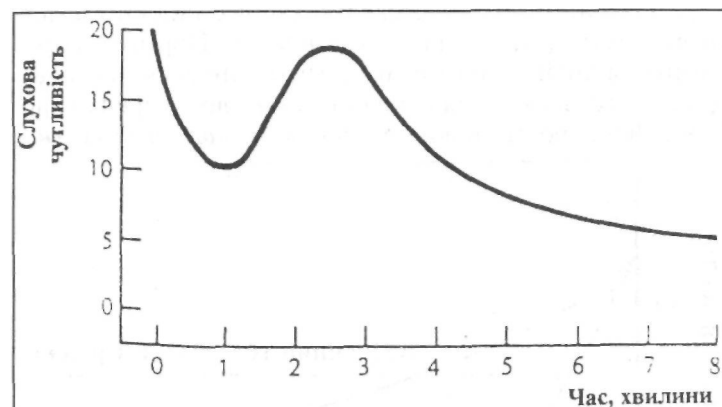


Рис. 2.38. Процес встановлення слухової чутливості, зменшеної під впливом шуму

Слух здатний відновлюватися після припинення дії шуму на рівнях інтенсивності, що не перевищують 30 дБ, вже через 16-24 години. Для помірних рівнів шумового впливу процес відновлення слуху характеризується лінійною залежністю від часу у логарифмічному масштабі. Вплив шумів більшої інтенсивності спричиняє незворотні пошкодження волоскових клітин, що призводить до сталого порогового зрушення. Експерименти на тваринах, які зазнали впливу акустичного шуму різної частоти, з подальшим гістологічним аналізом кількості пошкоджених або зниклих волоскових клітин у внутрішньому вусі свідчать про те, що поріг слухової чутливості зменшується в межах  $10^3$ - $10^4$  Гц. Кількість волоскових клітин, що залишилися, може становити при цьому лише 40 відсотків норми.

### Вібрації

Транспортні засоби, промислові агрегати, будівельні механізми і машини є джерелами вимушених механічних коливань, що утворюються в ґрунті (табл. 2.56). Основна частина коливальної енергії перено-

ситься поверхневими хвилями, що поширюються в приповерхневому шарі ґрунту (10-15 м).

Динамічний вплив джерел вібрації оцінюють *швидкістю вібрації*, що вимірюється в мм/с. Нормою вібраційних впливів є рівень 0,12 мм/с. Інтенсивність вібраційного поля залежить від відстані до джерела (рис. 2.39). Вібрацію оцінюють за рівнями *коливальних (ві-*

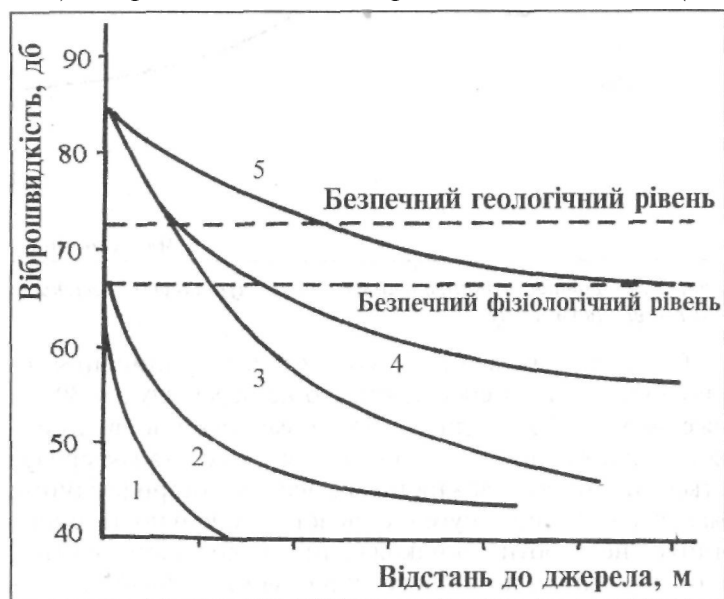


Рис. 2.39. Залежність інтенсивності вібраційного поля від відстані: 1 — вентиляційна шахта; 2 — автомобільний транспорт; 3 — залізничний транспорт; 4 — трамвай; 5 — механічний копёр

браційних) швидкостей в октавних смугах частот (в децибелах):

$$L_v = 20 \lg (V/V_0), \quad (2.28)$$

де  $V$  — значення коливальної швидкості, м/с;  $V_0$  — опорна коливальна швидкість, м/с.

#### Вплив вібрацій на живі організми

Високочутливі до вібрацій членистоногі та павуки. Нічні пустельні скорпіони, наприклад, визначають місце перебування жертви за вібраціями піску на відстані

до 0,5 м. На кожній з восьми кінцівок у них є рецептор вібрації, що генерує електричні розряди у відповідь на зміщення порядку 0,1 нм. Сукупність сигналів здатна орієнтувати скорпіона на джерело вібрації.

Рецептори таргана, розміщені на гомілках, здатні сприймати коливання з порогом  $10^{-7}$ - $10^{-10}$  см у діапазоні частот 1000-5000 Гц.

Мешканець водойм клоп-стародуб знаходить здобич за коливаннями поверхні води амплітудою в 1 мкм і частотою 100-500 Гц. Рецептори вібрації його містяться в дистальних ділянках кінцівок.

Мурашки-листорізи здатні реагувати на зміщення в межах  $1,3 \cdot 10^{-7}$  см і частоту 1-23 кГц; рецептори у них — у суглобах передніх кінцівок.

Водомірка-самка знаходить самця за коливанням води частотою 20 Гц.

Павуки відрізняють живу жертву від мертвої завдяки коливанням павутини, що відбуваються з частотою близько 50 Гц.

Реакція бджоли на вібрації субстрату, на поверхні якого вона перебуває, можлива завдяки субгенуальним органам (*s.scolopophora*) на гомілках передніх кінцівок. Саме ці рецептори використовуються під час спілкування бджіл у замкненому просторі вулика.

## ВОЛОГІСТЬ

### Вологість повітря

Вода може існувати в атмосфері у трьох фазах — рідкій, газоподібній і твердій. Газоподібна фаза води називається *парою*. Пара, що перебуває в термодинамічній рівновазі з рідиною (тобто в стані, коли число молекул, що переходить із рідини в пару, дорівнює числу молекул, що повертаються в рідину за одиницю часу), називається *насиченою*.

Під *вологістю* повітря розуміють наявність водяної пари у повітрі. Повітря, що містить водяну пару, називають *вологим*, а те, що не містить — *сухим*.

Розглянемо основні характеристики вологості повітря.

Абсолютна вологість повітря  $a$  — кількість водяної пари у грамах, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря ( $\text{г/м}^3$ ).

Насиченість водяної пари  $e$  (парціальний тиск) — тиск, який мала б водяна пара, що міститься в газовій суміші, якби вона одна займала об'єм, що дорівнює об'єму суміші при тій самій температурі. Насиченість водяної пари  $e$  визначають за формулою:

$$e = E_1 - A(t_c - t_{3M})P_A, \quad (2.29)$$

де  $E_1$  — максимальна насиченість водяної пари, що відповідає температурі змоченого термометра;  $A = 6,62 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$  — психрометричний коефіцієнт;  $t_c$  — температура сухого термометра;  $t_{3M}$  — температура змоченого термометра;  $P_A$  — атмосферний тиск (в мм рт. ст. або паскалях).

Максимальна насиченість водяної пари — граничне значення тиску, що відповідає рівновазі між парою і водою, тобто насиченому стану пари.

Максимальна насиченість водяної пари  $E_1$ , що відповідає температурі змоченого термометра, визначається в мм рт. ст. або в паскалях за таблицею.

Максимальна насиченість водяної пари  $E$ , що відповідає температурі сухого термометра, також визначається в мм рт. ст. або в паскалях за таблицею.

Відносна вологість повітря  $f$  — відношення насиченості водяної пари  $e$  до максимальної насиченості  $E$  при даній температурі:

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100\%. \quad (2.30)$$

Дефіцит вологості  $d$  — різниця між максимальною насиченістю  $E$  і фактичною насиченістю  $e$  при даній температурі.

Абсолютна вологість зв'язана з насиченістю водяної пари і температурою співвідношеннями:

$$a = \frac{1,06e}{1 + \alpha t}, \quad (2.31)$$

де  $e$  — насиченість водяної пари в мм рт. ст.;  $\alpha = 0,004 \text{ (} 1/^\circ\text{C)}$  — коефіцієнт об'ємного розширення газів, або

$$a = \frac{0,81e}{1 + \alpha t}, \quad (2.32)$$

де  $e$  — насиченість водяної пари в мілібарах або гектопаскалях.

Зв'язок максимальної насиченості водяної пари з температурою має вигляд:

$$\lg E = 9,4 - \frac{2345}{T}, \quad (2.33)$$

де  $E$  — в мілібарах,  $T$  — в кельвінах. Залежність тиску насиченої пари від температури наведено на рис. 2.40.

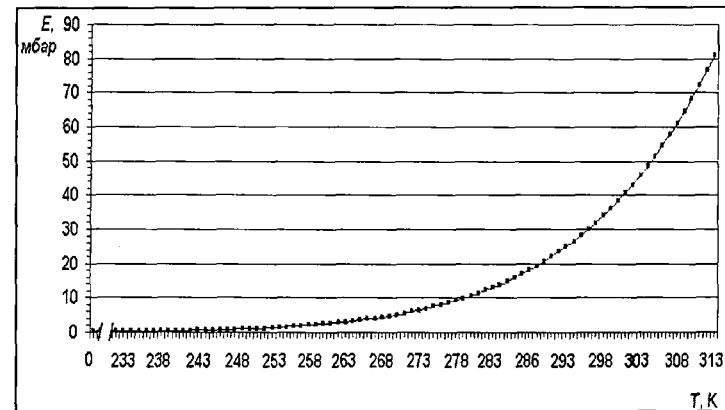


Рис. 2.40. Залежність тиску насиченої пари від температури

#### Методи вимірювання вологості повітря

**Аспіраційний психрометр.** Прилад містить два термометри — сухий і змочений; ціна поділки термометрів становить  $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Термометри встановлено в металевих трубках, потім з'єднаних в одну (рис. 2.41). Резервуар одного з термометрів обмотаний батистом, що змочу-

ється. При вимірюванні вологості психрометр встановлюють горизонтально і обдувають повітрям обидва термометри за допомогою вентилятора. З поверхні резервуара змоченого термометра відбувається випаровування води, що залежить від вологості навколишнього повітря. За допомогою аспіраційного психрометра можна оцінити парціальний тиск  $e$  за формулою (2.29), а відносну вологість — за формулою (2.30). Недоліком аспіраційного психрометра є те, що вентилятор захоплює повітря тільки на відстані кількох сантиметрів, а це не дає змоги точно визначити вологість на певних ділянках.

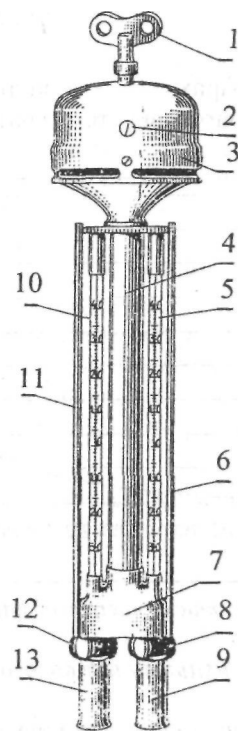


Рис. 2.41. Зовнішній вигляд аспіраційного психрометра:  
1 — заводний ключ; 2 — віконце; 3 — головка аспіратора;  
4 — трубка; 5 — сухий термометр; 6 — змочений термометр;  
7 — трійник; 8, 12 — ізоляційні втулки; 9, 13 — захисні трубки

*Сорбційний гігрометр.* В основу приладу покладено залежність електропровідності вологосорбуючої плівки від вологості середовища. Для цього використовують сіль  $LiCl$ .

*Волосяний гігрометр.* Дія приладу базується на здатності знежиреної волосини змінювати свою довжину при зміні вологості (рис. 2.42). Водяна пара здатна

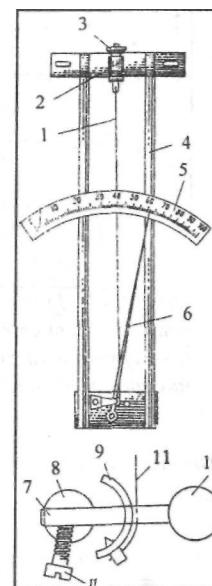


Рис. 2.42. Волосяний гігрометр: 1 — волосина; 2 — регулювальний гвинт; 3 — контргайка; 4 — рама; 5 — шкала; 6 — стрілка; 7 — стержень; 8 — вісь; 9 — кулачок; 10 — вага; 11 — гвинт

конденсуватися в капілярних порах людської волосини. Збільшення вологості призводить до зменшення вигнутості менісків води в порах, завдяки чому волосина видовжується. Видовження волосини відбувається пропорційно логарифму відносної вологості. Пучок таких волосин використовують в *гігрографі* — приладі для безперервного запису відносної вологості повітря.

### Вологість ґрунту

Ґрунт складається з твердих частинок, пори між якими заповнені повітрям (*сухий ґрунт*) або водою (*ґрунтовий розчин*). Але ці дві ситуації — екстремальні.

Взагалі в порах є і повітря, і вода. Для реалізації оцінки вологості ґрунту належить уявити зразок ґрунту як резервуар (рис. 2.43), в якому всі тверді частинки в кубі з ребром  $D$  і площею  $S$  стиснуті в шар завтовшки  $c$ ; ґрунтовий розчин і ґрунтове повітря, також розділені для порівняння, займають шари відповідно  $b$  і  $a$ .

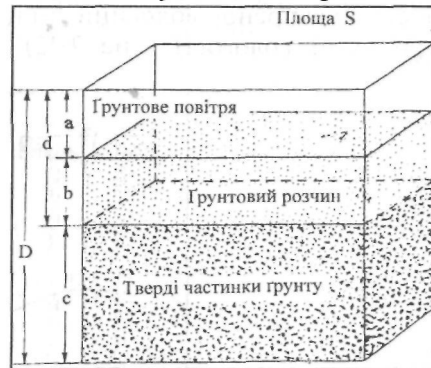


Рис. 2.43. Зразок ґрунту як резервуар:  $a$  — ґрунтове повітря;  $b$  — ґрунтовий розчин;  $c$  — тверді частинки ґрунту

*Вологість по відношенню до сухої маси* — відношення маси води до сухої маси:

$$\theta_m = \frac{m_b}{m_c} = \frac{\rho_b b S}{\rho_c c S} = \frac{\rho_b b}{\rho_c c} \quad (2.34)$$

де  $\rho_b$  і  $\rho_c$  — густина води і сухого ґрунту.

*Вологість у процентах сухої маси* визначають за виразом:

$$P_m = \theta_m \cdot 100\% \quad (2.35)$$

*Об'ємну вологість* — відношення об'єму води до загального об'єму ґрунту:

$$\theta_v = \frac{V_b}{V_m} = \frac{bS}{SD} = \frac{b}{D} \quad (2.36)$$

*Об'ємну вологість у процентах* визначають як:

$$P_v = \theta_v \cdot 100\% = 100\% \frac{b}{D} \quad (2.37)$$

*Товщину шару води  $D_e$*  розраховують як:

$$D_e = \frac{\rho_c c S}{SD} = \frac{\rho_c c}{D} \quad (2.38)$$

*Густина ґрунту* — відношення маси сухого ґрунту до загального об'єму ґрунту:

$$\rho_{gp} = \frac{\rho_c c S}{SD} = \frac{\rho_c c}{D} \quad (2.39)$$

*Пористість ґрунту  $E$*  — відношення сумарного об'єму пор до загального об'єму ґрунту:

$$E = \frac{dS}{SD} = \frac{d}{D} \quad (2.40)$$

*Вологість насичення  $\theta_{ms}$*  — відношення маси води при насиченості до маси сухого ґрунту:

$$\theta_{ms} = \frac{\rho_b d S}{\rho_c c S} = \frac{\rho_b d}{\rho_c c} \quad (2.41)$$

### Вимірювання вологості ґрунту

*Гравіметричний метод* базується на визначенні маси води і маси сухого ґрунту.

*Електричний метод* ґрунтується на вимірюванні залежності електропровідності ґрунту від вологості.

*Нейтронний метод* заснований на оцінці ослаблення потоку нейтронів атомами водню, що містяться в ґрунтовій воді.

### Вплив вологості на живі організми

Відносна вологість відіграє значну роль у життєдіяльності наземних тварин. Повітря, що оточує твари-

ну, містить менше вологи, ніж її власне тіло. Втрати води живим організмом відбуваються з кінцевими продуктами обміну речовин. Забезпечується організм водою в процесі живлення та пиття. Чим вища відносна вологість, тим менша різниця між зовнішнім та внутрішнім середовищами тварини і тим, відповідно, менша потреба в зниженні втрат води або в протидії їм. Тварини різняться за здатністю пристосовуватися до певної відносної вологості. На це впливають і спосіб життя, і навколишні умови, про що, наприклад, свідчить залежність від вологості температури тіла амфібій, рептилій, комах. Істотно впливає вологість на поширення наземних тварин, які через спосіб підтримання водного балансу залишаються «водними» — земноводних, наземних ракоподібних, нематод, дощових черв'яків, молюсків тощо. Зазвичай, вони мешкають там, де відносна вологість близька до 100%.

Рослини мають надземну частину, що зазнає таких втрат води, як і тварина; але підземна частина має безпосередній контакт з середовищем, з якого постається вода. Крім того, вода є не тільки зовнішнім фактором, але й ресурсом, що забезпечує життєдіяльність рослини. Саме тому відносна вологість значно впливає на швидкість врати води при транспірації. Розглянемо процеси, пов'язані з вологістю.

*Випаровування* — перехід речовини з рідкого стану в газоподібний (пару). За рік з поверхні Світового океану випаровується майже  $450 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup> води, а з поверхні суші — близько  $70 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup>. Швидкість випаровування залежить від вологості повітря, температури поверхні, вітру.

*Конденсація* — перехід речовини внаслідок охолодження або тиску з газоподібного стану в рідкий. Конденсація можлива при температурах, менших за критичні для даної речовини. Критичною температурою для атмосферної води є температура танення льоду (273,2 К). Необхідною умовою конденсації є наявність центрів конденсації, функції яких в атмосфері виконують дрібні частинки — аерозолі або іонізовані атоми. Основними продуктами конденсації є *туман, роса, іній, паморозь, ожеледь* тощо.

Процес одночасної конденсації й розсіювання водяної пари в атмосфері супроводжується утворенням *хмар*. Воду, що випадає на земну поверхню з хмар у рідкому або твердому стані називають *атмосферними опадами*. За зовнішнім виглядом розрізняють такі типи опадів як *дощ, сніг, крупа, град, мряка* тощо. Відповідно до характеру випадання опади діляться на *облогові, зливові та мрячні*. Стресову ситуацію можуть викликати град і зливові дощі.

*Град* — це продукт конденсації водяної пари у грозових хмарах, де висхідні потоки повітря рухаються з швидкістю понад 10 м/с, а температура становить — 20 ÷ 30 °C. У 1993 р. у Кіровоградській області градини мали розміри курячого яйця; град завдав шкоди — загинуло 35 тис. гектарів сільськогосподарських посівів. У 1984 р. у Таджикистані випав град, у якому маса окремих градин досягала 880 г.

*Зливи* — це дощі з інтенсивністю понад 0,5 мм за хвилину. За сильних злив може випасти за годину 30 мм і більше вологи, що перевищує зимову місячну норму на півдні України. Зливові дощі призводять до вимивання рослин навіть на невеликих схилах, пошкодження посівів, водної ерозії ґрунту.

## ТЕМПЕРАТУРА

*Температура* — фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Кількісне вимірювання температури можливе завдяки впровадженню температурних шкал. В одній з них, *міжнародній стоградусній температурній шкалі (Цельсія)* вважають за 0 °C температуру плавлення льоду і як 100 °C — температуру кипіння води при нормальному тиску. В іншій — *термодинамічній температурній шкалі (Кельвіна)* використовують потрібні точки речовин — точки на діаграмі стану, що відповідають рівноважному існуванню трьох фаз речовини. Так, потрібна точка води дорівнює 273,15 К, а температура кипіння води становить 373,15 К. Між двома шкалами існує зв'язок:

$$t^{\circ}\text{C} = T - 273,15. \quad (2.42)$$

### Теплоємність та питома теплоємність

Коли тіло має температуру, відмінну від температури навколишнього середовища, воно віддає або набуває теплової енергії, щоб досягти теплової рівноваги або стаціонарного стану.

*Теплоємність тіла  $C$*  — величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати даному тілу для нагрівання на 1 К:

$$C = Q/\Delta t, \quad (2.43)$$

де  $Q$  — кількість теплоти, передана тілу для нагрівання на  $\Delta t$  градусів.

Одиниця вимірювання теплоємності — Дж·К<sup>-1</sup>.

*Питома теплоємність речовини  $c$*  — величина, що чисельно дорівнює кількості тепла, яке необхідно надати даній речовині масою 1 кг для нагрівання на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}. \quad (2.44)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоємності — Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Зв'язок питомої теплоємності тіла  $C$  з питомою теплоємністю речовини  $c$  виражається формулою:

$$C = c \cdot m. \quad (2.45)$$

Кількість теплоти, необхідна для зміни температури тіла масою  $m$  на величину  $\Delta T$ , визначається як:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (2.46)$$

де  $c$  — питома теплоємність.

### Тепловий обмін

Тепловий обмін живих організмів з навколишнім середовищем здійснюється завдяки таким основним процесам як *теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання та випаровування*.

*Теплопровідність* — перенесення тепла від більше нагрітих тіл до менше нагрітих, що забезпечує вирівнювання температури.

*Закон Фур'є: кількість перенесення тепла шляхом теплопровідності прямо пропорційна градієнту температури*

$$\Delta Q = -k \cdot S \frac{\Delta T}{\Delta X} \cdot \Delta t, \quad (2.47)$$

де  $k$  — коефіцієнт теплопровідності (Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>).

*Температуропровідність  $a^2$*  — параметр, що характеризує швидкість зміни температури в нестационарних теплових процесах, є мірою теплоінерційних властивостей речовини і чисельно дорівнює відношенню коефіцієнта теплопровідності речовини до добутку його питомої теплоємності на густину:

$$a^2 = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (2.48)$$

Одиниця вимірювання температуропровідності — м<sup>2</sup>·с.

*Конвекція* — процес теплообміну, що супроводжується перемішуванням нагрітих і холодних шарів рідини або газів. Розглянемо, як можна оцінити обмін теплотою через конвекцію тваринами і рослинами.

Кількість теплоти (Вт·м<sup>-2</sup>), яким обмінюється тварина з навколишнім середовищем за одиницю часу з одиниці поверхні тіла (густина потоку теплоти) завдяки конвекції, можна оцінити, припускаючи, що тіло тварини являє собою циліндр діаметром  $D$ , за допомогою виразу:

$$Q = \frac{K_{\text{пов}}(T_s - T_a)}{R \cdot \ln\left(\frac{R + \delta}{R}\right)}, \quad (2.49)$$

де  $K_{\text{пов}}$  — коефіцієнт теплопровідності повітря;  $R = D/2$  — радіус циліндра;  $\delta$  — товщина поверхневого

шару, в межах якого відбувається конвекція;  $T_s$  і  $T_A$  — температура відповідно поверхні тіла тварини і навколишнього середовища.

Величина  $\delta$  оцінюється за допомогою рівняння:

$$\delta(\text{мм}) = 5,8 \cdot \sqrt{\frac{D(\text{м})}{V(\text{м/с})}}, \quad (2.50)$$

де  $V$  — швидкість руху повітря вздовж поверхні тіла тварини.

Для рослинного листка, якого можна уявити як тіло з пласкою поверхнею, лінійний розмір якої  $L$ , втрати теплоти з одиниці площі поверхні при конвекції можна оцінити за виразом:

$$Q = \sqrt[4]{\frac{V}{L}} (T_s - T_A) \quad (2.51)$$

Теплове випромінювання — електромагнітне випромінювання, що утворюється речовиною і виникає за рахунок її внутрішньої енергії.

Теплове випромінювання підпорядковується таким законам:

Закон випромінювання Планка дає спектральну залежність емісійної здатності абсолютно чорного тіла, функція якої, віднесена до одиничного інтервалу частот, має вигляд:

$$W = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (2.52)$$

де  $h$  — стала Планка;  $c$  — швидкість світла;  $T$  — абсолютна температура;  $k$  — стала Больцмана;  $e$  — основа натурального логарифма.

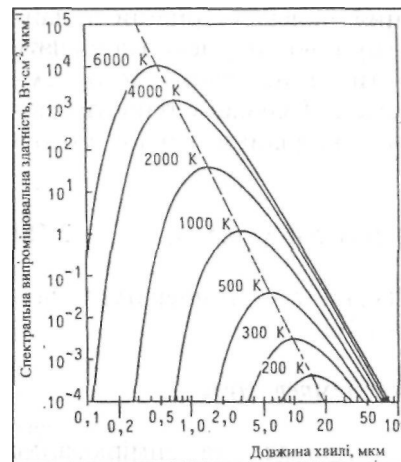


Рис. 2.44. Спектральне положення максимуму випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла залежно від температури

З рис. 2.44 видно, що повна енергія, яка випромінюється, представлена площею під кривою і швидко збільшується із зростанням температури. Частота  $\nu_{\max}$ , на яку припадає максимум випромінювальної здатності, також зростає з підвищенням температури.

Закон зміщення Віна: довжина хвилі  $\lambda_{\max}$ , на яку припадає максимум енергії в спектрі рівноважного випромінювання, обернено пропорційна абсолютній

температурі  $T$  тіла, що випромінює:

$$\lambda_{\max} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1}; \quad (2.53)$$

частоту  $\nu_{\max}$  при цьому визначають як  $\nu_{\max} = 1,03 \cdot 10^{11} \cdot T$ .

Закон Стефана-Больцмана: інтенсивність повної випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла ( $\text{Вт/м}^2$ ) залежить від четвертого ступеня температури:

$$I = \sigma \cdot T^4, \quad (2.54)$$

де  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ .

Тіло з температурою  $T_1$ , що міститься в навколишньому середовищі з температурою  $T_2$ , випромінює потік тепла:

$$I_T = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.55)$$

Випаровування — процес переходу речовини з рідкого або твердого стану в газоподібний (пару).



У процесі випаровування молекули рідини з найбільшою швидкістю і кінетичною енергією залишають поверхню тіла живої істоти, в результаті чого температура поверхні знижується. Кількість теплоти, необхідної для перетворення 1 кг рідини в пару, можна оцінити за формулою:

$$Q = 4,187 \cdot 10^3 \cdot (596 - 0,56t), \quad (2.56)$$

де  $Q$  вимірюється в Дж/кг;  $t$  — температура навколишнього середовища — в  $^{\circ}\text{C}$ .

### Вимірювання температури

**Рідинний термометр** — прилад для вимірювання температури, що ґрунтується на тепловому розширенні рідини, складається з скляного резервуара, з'єднаного з капіляром і шкалою. Робочою речовиною є спирт ( $-80^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$ ) або ртуть ( $-35^{\circ}\text{C} \div +750^{\circ}\text{C}$ ). Явище теплового розширення рідини описується рівнянням:

$$\Delta V = \beta V \Delta T, \quad (2.57)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт об'ємного розширення рідини;  $\Delta V$  — зміна об'єму;  $\Delta T$  — зміна температури.

**Манометричний термометр.** Принцип дії ґрунтується на тепловому розширенні робочої речовини (газу або ртуті), що фіксується манометром (рис. 2.45). Складається з балона, з'єднаного капіляром з пружинним манометром. Діапазон температур —  $60^{\circ}\text{C} \div +550^{\circ}\text{C}$ .

**Газовий термометр.** Прилад, дія якого базується на залежності тиску  $p$  або об'єму  $V$  від температури. Вимірює температуру в діапазоні  $2 \div 1200\text{K}$ .

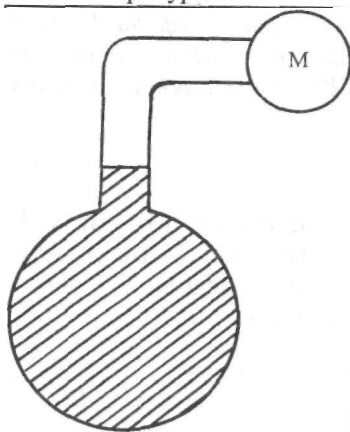
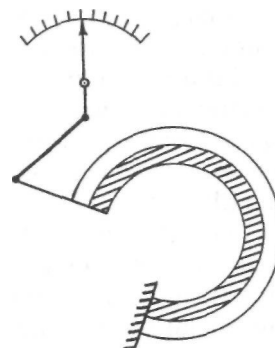


Рис. 2.45. Газовий термометр



**Деформаційний термометр.** Принцип дії ґрунтується на деформації біметалевої пластини (інвар і сталь, наприклад) під впливом температури (рис. 2.46). Переміщення вільного кінця  $\Delta X$  під час зміни температури  $\Delta t$  описується формулою:

$$\Delta X = K \Delta t, \quad (2.58)$$

Рис. 2.46. Деформаційний термометр

де  $K$  — коефіцієнт пропорційності.

Видно, що залежність лінійна, а шкала приладу — рівномірна.

**Термометри опору** — прилади, принцип роботи яких ґрунтується на властивості матеріалів змінювати електричний опір під впливом температури.

Для провідників залежність опору від температури має вигляд:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (2.59)$$

де  $R$  — опір провідника при температурі  $t$ ;  $R_0$  — опір при температурі  $t_0$ ;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору провідника;  $\Delta T = t - t_0$ .

Для напівпровідників опір спадає з підвищенням температури за формулою:

$$R = R_0 e^{E/kT}, \quad (2.60)$$

де  $E$  — енергія активації;  $T$  — температура;  $k$  — стала Больцмана.

Провідники в таких вимірюваннях називають *терморезисторами*, а напівпровідники — *термісторами*.

**Термоелектричні термометри** використовують термоелектричні явища, що проявляються за взаємозв'яз-

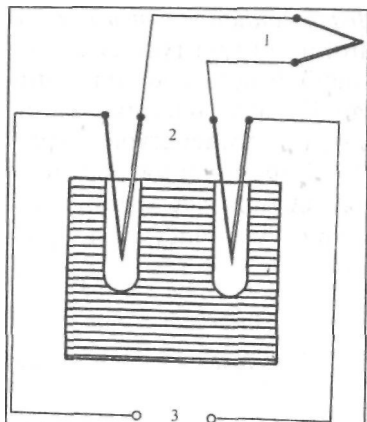


Рис. 2.47. Використання термопар для вимірювання температури: 1 — контрольна термопара; 2 — опорні термопари; 3 — джерело струму

ку теплових та електричних процесів у твердих тілах. Одним з таких термоелектричних явищ є ефект Зеебека — виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різномірних провідників, контакти яких мають різну температуру (рис. 2.47). Температурна залежність ЕРС визначається за формулою:

$$E = a(T_1 - T_2), \quad (2.61)$$

де  $a$  — коефіцієнт Зеебека (термоелектрична властивість пари провідників);  $T_1$  і  $T_2$  — температури місць з'єднання провідників.

### Температура повітря

Тепловим режимом атмосфери називають характер розподілу та зміни температури в атмосфері. Обмін тепла між поверхнею Землі й атмосферою відбувається такими шляхами тепловіддачі як *теплова конвекція, турбулентність, молекулярна теплопровідність та тепловипромінювання*. Найважливішими при цьому є турбулентність і теплова конвекція. Істотно впливає на розподіл температури приземного шару повітря рослинний покрив.

За характером зміни температури з висотою атмосфера ділиться на *тропосферу* (220К), *стратосферу* (260К), *мезосферу* (180К) і *термосферу* (2000К). Зміну температури атмосфери з висотою наведено на рис. 2.48. В тропосфері температура спадає з висотою через переміщення повітря в горизонтальному напрямку. Стратосфера характеризується зростанням температури, що можна пояснити поглинанням сонячного ви-

промінювання озоновим шаром, який міститься в тропосфері. В мезосфері температура знижується з висотою, оскільки тут відбувається значне перемішування повітря завдяки вітру, швидкість якого досягає 150 м/с. У термосфері температура зростає з висотою завдяки високій кінетичній енергії молекул газів, хоча там і велика розрідженість повітря. В приповерхневому шарі повітря зміна температури характеризується *вертикальним градієнтом температури* — зміною температури в градусах Цельсія на кожних 100 м висоти:

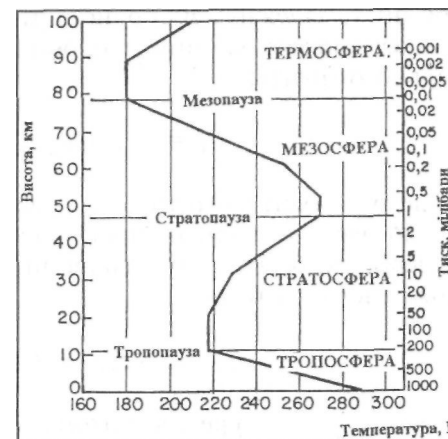


Рис. 2.48. Вертикальний профіль температури атмосфери

$$\gamma = - \frac{t_a - t_n}{h_a - h_n} \cdot 100\%, \quad (2.62)$$

де  $t_a$  і  $t_n$  — температури повітря на верхньому  $h_a$  та нижньому  $h_n$  рівнях.

### Температура ґрунту

Температура ґрунту залежить від таких факторів як *теплообмін з повітрям (теплопровідність і конвекція), тепловипромінювання, теплопровідність в ґрунті, випаровування, зволоження, конденсація*.

Важливим фактором, який впливає на тепловий потік, що надходить у ґрунт, є колір останнього. Роль його зводиться до зміни альбедо і, таким чином, радіаційного балансу. Істотно впливає на тепловий потік у ґрунт наявність ізолюючих шарів (гравію, соломи то-

що) на поверхні. Нагрівання і охолодження ґрунту залежить від його теплоємності і теплопровідності. Теплоємність залежить від пористості і вологості ґрунту.

Розглянемо об'ємну теплоємність вологого мінерального ґрунту:

$$C_V = \rho_s(1 + \theta_m)c_p, \quad (2.63)$$

де  $\rho_s$  — густина ґрунту;  $\theta_m$  — вологість по відношенню до маси;  $c_p$  — теплоємність по відношенню до маси.

Крім того, об'ємну теплоємність вологого ґрунту можна визначити як:

$$C_V = \rho_s(\langle c_{mf} \rangle + \theta_m c_w), \quad (2.64)$$

де  $\langle c_{mf} \rangle$  — середня питома теплоємність твердої фази;  $c_w$  — питома теплоємність води.

Середня питома теплоємність твердої фази більшості ґрунтів становить  $\langle c_{mf} \rangle \approx 837,36$  Дж/(кг·°C). Питома теплоємність води дорівнює  $c_w = 4186,8$  Дж/(кг·°C).

Звідси

$$C_V = \rho_s(837,36 + \theta_m 4186,8) = 837,36 (1 + 5\theta_m), \quad (2.65)$$

де  $\rho_s$  підставляють в кг/м³.

Комбінуючи вирази (2.63) і (2.65), маємо:

$$c_p = C_V / [\rho_s(1 + \theta_m)] = 837,36 (1 + 5\theta_m) / (1 + \theta_m). \quad (2.66)$$

З врахуванням того, що  $\theta_m = \theta_v \cdot \rho_v / \rho_s$ , можна отримати такий вираз:

$$C_V = \rho_s(1 + 5 \theta_v \cdot \rho_v / \rho_s) = (\rho_s + 5 \theta_v \rho_v). \quad (2.67)$$

Теплопровідність і температуропровідність ґрунту залежать від складу ґрунту, температури й вологості. Ґрунт складається з твердих частинок піску, глини, органічних речовин. Проміжки між ними заповнені або повітрям, або водою. Частинки піску мають неправильну форму і стикаються між собою лише в окремих

## 2.6. Коефіцієнт теплопровідності повітря і води

Речовина	Коефіцієнт теплопровідності, Втм/К'	Температура, °C
Повітря (сухе)	0,0237	-10
Те ж	0,0243	0
Те ж	0,0250	10
Те ж	0,0257	20
Те ж	0,0264	30
Те ж	0,0270	40
Те ж	0,0277	50
Вода	0,565	0
Те ж	0,599	20
Те ж	0,627	40

## 2.7. Теплові властивості піску залежно від температури і вологості

$t = 5 \div 10$  °C

Вологість, %	0,20	1,38	4,03	5,73	8,75	13,79
Коефіцієнт температуропровідності $a^2 \cdot 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$	2,26	4,86	8,00	8,39	8,47	7,71
Коефіцієнт теплопровідності $k, \text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$	0,29	0,63	1,15	1,26	1,50	1,55

$t = -3 \div 5$  °C

Вологість, %	0,42	1,60	3,85	5,17	7,25	11,21
Коефіцієнт температуропровідності $a^2 \cdot 10^{-7}, \text{м}^2/\text{с}$	2,31	6,25	8,39	9,25	9,78	11,40
Коефіцієнт теплопровідності $k, \text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$	0,29	0,80	1,25	1,45	1,67	2,46

## 2.8. Значення коефіцієнта теплопровідності і питомої теплоємності ґрунтів, ґрунтової води і ґрунтового повітря

Коефіцієнт теплопровідності (Дж/(м·с·К))

Граніт	4,2
Глина волога	2,1
Пісок сухий	1,0
Торф	0,84
Лід	2,034
Вода нерухома	0,5
Повітря нерухоме	0,02!

Питома теплоємність  $c_{\text{пф}}$  (Дж/(кг·К))

Торф	2,18	Пісок	0,80
Гумус	0,44	Солонець	0,59
Чорнозем суглинистий	1,26	Підзол	0,76
Чорнозем супіщаний	1,09	Вода	4,186
Глина	0,92	Повітря ґрунтове	1,0048
Суглинок	0,84		

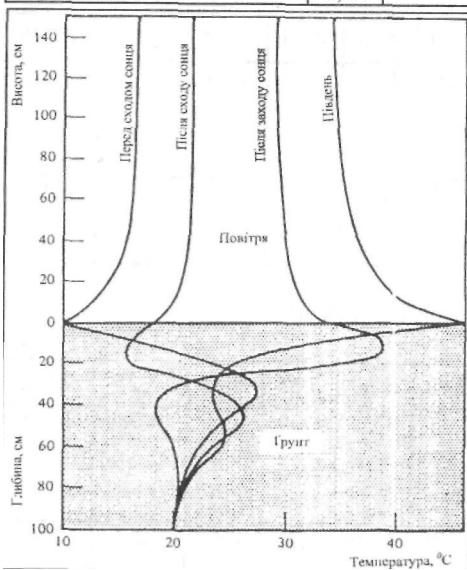


Рис. 2.49. Температурний профіль повітря і ґрунту поблизу ґрунтової поверхні протягом доби

точках. Якщо пісок сухий, то на тепловий режим впливатиме повітря з малим коефіцієнтом теплопровідності (табл. 2.6). Передача тепла від однієї частинки піску до іншої відбуватиметься повільно. Якщо пісок вологий, коефіцієнт теплопровідності

зростає і передача тепла полегшується. Аналогічний ефект спостерігається при ущільненні ґрунту. Малу теплопровідність мають торф'яні ґрунти через пухкість та великий вміст органічних речовин і повітря. Замерзання ґрунту супроводжується перетворенням вільної води в лід з відповідним зростанням теплопровідності й температуропровідності. Для сухих ґрунтів температуропровідність  $a'$  дорівнює приблизно  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а для вологих — близько  $10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Як приклад, в табл. 2.7 наведено залежність теплових властивостей піску від вологості та температури. Значення питомої теплоємності ґрунтів наведено в табл. 2.8, а коефіцієнта теплопровідності — в табл. 2.9. Всі ці параметри впливають на характер розподілу температури в ґрунті та в приповерхневому шарі повітря (рис. 2.49).

### Температура водойм

Зміна температури у водоймах відбувається не так, як у ґрунті. Теплоємність води, як це видно з табл. 2.7, в 24-7 разів перевищує теплоємність ґрунту. Крім того, температурний режим водойми визначається сонячним випромінюванням, що проникає вглиб і нагріває воду. Впливає на зміну температури й турбулентність, завдяки чому інтенсивність теплопереносу значно зростає. В цілому, у водному середовищі через високу теплоємність не відбувається різка зміна температури; температурні умови тут стабільніші, ніж на суші.

У річках з повільною течією та озерах влітку поверхневі води нагріваються швидше, ніж глибинні. Теплове випромінювання поглинається шаром води завтовшки К2 м. Цей верхній теплий шар називають

епілімніоном, а холодний нижній — гіполімніоном. Між ними міститься проміжний шар — металімніон, в якому температура змінюється дуже швидко при незначних змінах глибини. Наявність таких шарів зумовлює утворення температурного градієнта.

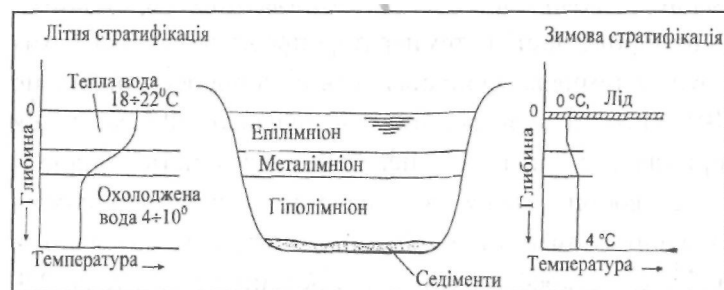


Рис. 2.50. Теплова стратифікація по глибині охра улітку і зимою

Озера мають характерну температурну стратифікацію, що залежить від пори року (рис. 2.50). Взимку поверхневий лід має температуру 0 °C, а вода під ним — 3,94 °C (густина води при цьому максимальна). Низька температура і зменшення проникності сонячного випромінювання призводить до пригнічення біологічної продуктивності озера. Влітку поверхнева вода нагрівається швидко і у верхніх шарах відбувається постійне її перемішування, що сприяє росту фітопланктону. Таким чином, продуктивність озер залежить від теплової стратифікації.

### Температурні стресові ситуації

Заморозками називають зниження температури в приземному шарі повітря та на поверхні ґрунту до 0 °C і нижче при позитивних середньодобових температурах. Причиною заморозків є нічне випромінювання тепла земною поверхнею або надходження холодних мас з півночі, чи комбінація обох цих причин.

Посуха — це стан погоди, що призводить до тривалої й значної нестачі опадів порівняно з нормою при

підвищених температурах повітря і випаровуванні. Розрізняють *грунтову посуху* (дефіцит вологи в ґрунті) і *повітряну* (надмірне випаровування води з поверхні рослин призводить до від'ємного водного балансу). Причиною ґрунтової посухи є відсутність опадів, повітряної — сухі вітри зі швидкістю 5-10 м/с, що супроводжуються низькою (25-30%) відносною вологістю.

### Вплив температури на тварин

Всі живі організми діляться на *ендотерміє*, які регулюють температуру тіла за рахунок внутрішньої теплопродукції, та *ектотермів*, які покладаються на зовнішні джерела тепла. Ссавці і птахи є ендотермами, а інші тварини — ектотермами.

Ендотермні організми здатні підтримувати температуру тіла на постійному (35-40 °C) рівні; саме через це вони віддають тепло навколишньому середовищу. Втрати тепла вповільнюються завдяки теплоізоляції, функції якої виконують волосяний покрив, підшкірний жир, оперення, а також за допомогою регуляції кровообігу під поверхнею шкіри. Незважаючи на добру теплоізоляцію, процес збереження тепла в ендотермних тварин досягається завдяки інтенсивним метаболічним затратам.

В умовах спекотного і сухого клімату ендотермні тварини мають перевагу, зумовлену невеликим значенням відношення «поверхня-маса» і високою теплоємністю. Через те, що тканини більшістю складаються з води, теплоємність цих тканин становить  $c_w = 4186,8 \text{ Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$  для інтервалу температур 0-40 °C. Отже, чим більше тварина, тим більшу кількість тепла містить її тіло при даній температурі. Важливу роль в процесі тепловіддачі відіграє регуляція кровообігу: при високих температурах кровеносні судини шкіри розширюються і тепловіддача збільшується.

Якщо температура зовнішнього середовища перевищує верхню межу термонеutralної зони, то тепло активно розсіюється за допомогою процесу випаровування, тобто або потовиділення, або теплової задишки. Процес потовиділення не завжди супроводжується випаровуванням вологи. Ефективним спосо-

бом збереження в організмі тепла й води є дихання через рот (а не тільки через ніс). Тварина (наприклад, собака), яка страждає від перегрівання, вдихає через ніс, а видихає через рот, забезпечуючи додаткове випаровування з поверхні язика.

Із рис. 2.51 видно, що підвищення температури зовнішнього середовища впливає на інтенсивність процесів тепловіддачі. Так, кількість тепла, яким обмінюється тварина завдяки конвекції або випромінювання, наближається до нуля, якщо температури тіла тварини і навколишнього середовища однакові (див. *формули (2.48), (2.54)*). У той же час процес випаровування активізується з підвищенням температури.



Рис. 2.51. Кількісні параметри втрати тепла твариною при різних температурах повітря

Високі температури зумовлюють зростання швидкості обміну речовин, що сприяє підвищенню продукції тепла. Крім того, процеси дихання і випаровування спричиняють зневоднення організму. Зростання температури понад норму називають *гіпертермією*. Коли сільськогосподарських тварин, що живуть у європейських країнах, транспортують в тропічні або субтропічні зони, це нерідко супроводжується тепловими стресами. Втрата апетиту, здатності споживати та використовувати корми, порушення терморегуляції та обміну речовин — усе це призводить до вповільнення розвитку тварин та зменшення обсягів тваринницької продукції.

У спекотну зволожену погоду тваринам важко віддавати тепло, оскільки процеси випаровування неефективні. Фізична робота, яку змушені виконувати тварини, призводить до небезпечного підвищення

температури тіла. Аналогічна ситуація складається, коли собаку зачиняють у машині, поставлений на сонці; продукти дихання насичують повітря водяною паром і подальші втрати тепла стають неможливими. Перевищення температури значень 41,5–42,5 °C призводить до серйозного порушення функціонування організму і втрати свідомості, тобто до *теплого удару*. Неприятливий вплив високих температур пов'язаний з відносною вологістю повітря — чим менша відносна вологість, тим вища вірогідність зневоднення організму. Безумовно, істотну роль тут відіграє тривалість дії високих температур.

Ефективним способом протидії низьким температурам в ендотермних організмів є волосяний покрив або підшкірний жир, що виконують функції теплоізолятора (теплопровідність хутра та жиру невисока). Зміна теплопровідності під час тепловіддачі здійснюється завдяки інтенсивності периферійного кровотоку, або теплоізоляційній ефективності волосяного покриву чи оперення. Регуляція шкіряного кровотоку забезпечується шунтуванням артеріальної крові (рис. 2.52): в шкірі судини звужуються, а потоки крові внутрішніх органів збільшуються. Те саме відбувається у підшкіряному жирі.

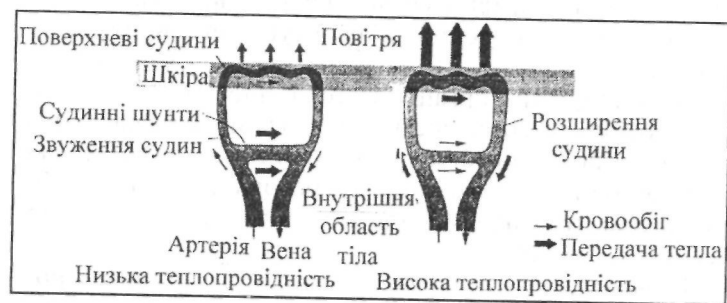


Рис. 2.52. Роль шкіряного кровообігу в регуляції теплопровідності поверхневих тканин організму (пояснення в тексті)

Шерсть не має кровопостачання, тому її теплоізоляційні властивості змінюються при зміні кута нахилу волосся і товщини волосяного покриву тварини. Якщо

температура зовнішнього середовища менша за нижню межу термонеутральної зони, до процесу залучається *термогенез*. Розрізняють два типи термогенезу — зумовлений активацією у всьому організмі ферментативних систем обміну жирів і тремтінням.

Перший спосіб ґрунтується на тому, що під час розщеплення або окислення жирів виділяється тепло. У деяких тварин, які реалізують цей спосіб теплопродукції, є спеціалізована бура жирова тканина, що міститься в межах шиї та між лопатками. В цій тканині, насиченій кровоносними судинами, де міститься багато мітохондрій, відбувається процес окислення жирів, що супроводжується виділенням тепла. Другий спосіб передбачає можливість нагрівання організму за м'язових скорочень. Нервова система активізує різні групи скелетних м'язів, внаслідок чого виникають дрібні результуючі рухи — тремтіння. Хімічна енергія, що утворюється через гідроліз АТФ, вивільняється у вигляді тепла. Втрати тепла у таких тварин зменшуються також завдяки невеликому значенню відношення «поверхня : об'єм».

Ектермні організми отримують тепло з навколишнього середовища за рахунок сонячного (прямого, розсіяного і відбитого) випромінювання, атмосферного випромінювання; теплообмін здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції, випаровування і випромінювання.

В ектермних організмів теплопровідність тіла висока, оскільки вони погано ізолювані. Внаслідок цього тепло, що виділяється через обмінні процеси, швидко переходить у навколишнє середовище. З іншого боку, висока теплопровідність дає змогу легко поглинати тепло з довкілля.

В ектермів протягом еволюційного розвитку розвинулася певна стратегія виживання в стресових температурних умовах. Деякі ектермні організми здатні змінювати частоту серцевих скорочень або кровообігу в поверхневих тканинах, завдяки чому нагрівання тіла відбувається значно швидше, ніж охолодження. Ектерми, що мешкають в умовах холодного клімату, мають у клітинах речовини-антифризи, що дає їм змогу

витримувати температури, нижчі нуля; інші використовують тремтіння або скорочення м'язів, або регулюють кровообіг крізь шкіру. Існують ектерми, в тканинах яких не утворюються кристалики льоду. Можлива поведінкова терморегуляція завдяки вибору місця відпочинку або орієнтації тіла.

### Термостатична регуляція температури тіла

Температура тіла в ендотерміє та деяких ектерміє регулюється нейронним термостатом. В основі системи термостатичної регуляції лежить терморегуляторний центр, розміщений в *гіпоталамусі*. В передній частині гіпоталамуса містяться нейрони, що різко збільшують частоту імпульсації при підвищенні температури; саме ці нейрони активізують реакції, спрямовані на відведення надлишкового тепла (наприклад, розширення судин, потовиділення). Інші нейрони здатні зменшувати частоту імпульсів після того, як температура гіпоталамуса зростає і стає вищою за певну (опорну) величину (рис. 2.53). Крім того, є й такі нейрони, які збільшують частоту імпульсації, якщо температура гіпоталамуса стане меншою за опорну температуру. Ці нейрони активізують реакції, спрямовані на підвищення температури (тремтіння, обмін бурі жирової тканини) і збереження тепла в організмі (піломоторні реакції).

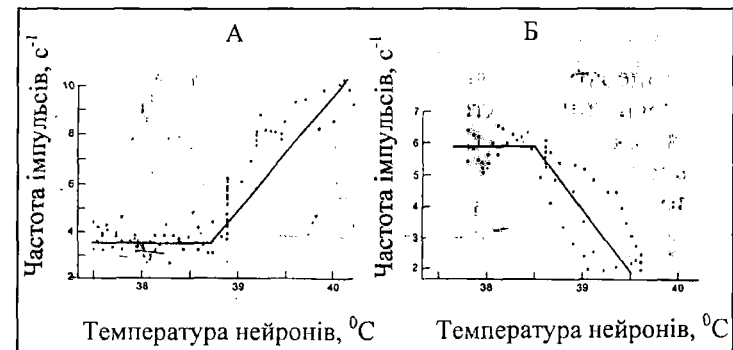


Рис. 2.53. Залежність електричної активності нейронів гіпоталамуса від температури

Фізичну схему терморегуляції у ссавців, побудовану на принципі зворотного зв'язку, наведено на рис. 2.54. Центри гіпоталамуса узагальнюють інформацію, що подається від розкиданих по організму центральних і периферійних терморецепторів, порівнюють її з опорною температурою і діють у відповідному напрямі на механізми або тепловіддачі, або теплопродукції. Охолоджена чи нагріта таким чином кров розподіляється по організму, постачаючи інформацію (*зворотний зв'язок*) терморецепторам і гіпоталамічним центрам. Активізація термоефекторів (бурої жирової тканини, м'язів, поверхні, з якої випаровується волога) припиняється, коли температура тіла досягає опорної температури.

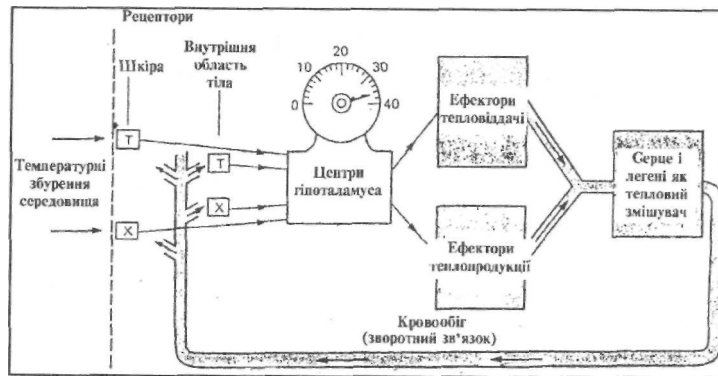


Рис. 2.54. Терморегуляторний центр, розміщений в гіпоталамусі (пояснення в тексті)

Температура навколишнього середовища є важливим зовнішнім фактором для риб, більшість з яких нерестяться навесні. Оптимальна для нересту й ембріонального розвитку температура не перевищує 8 °С. Молодь і дорослі риби мають інші діапазони оптимальних температур: 20-21 °С для лососевих, 22+23 °С — для сигових тощо. Підвищення температури на 2 °С порівняно з нормальною для осені і зими може несприятливо позначитися на нересті сигів, а підвищення на 5-6 °С температури води може спричинити смертність ембріонів лососевих і затримки розвитку молоді.

## ТЕРМОРЕЦЕПЦІЯ

### Механізми терморецепції

*Терморецепція* — це сприймання зміни температури нервовою тканиною, терморецепторами, що супроводжується виникненням нервових імпульсів, з наступним передаванням сигналу в центральну нервову систему.

Щодо механізмів терморецепції живих організмів не існує єдиної думки. Згідно з однією гіпотезою (Frey M.), терморецепторна система складається з окремих рецепторів, що сприймають тепло й холод і розміщені у тільцях Руффіні та колбах Краузе відповідно. Інша гіпотеза (Nafe J.) припускає сприймання температури єдиними терморецепторами, якими є нервові закінчення стінок маленьких артеріол, що містяться у шкірі. При цьому холод спричинює звуження, а тепло — розширення кровоносних судин; механічні переміщення, таким чином, перетворюються на сигнали нервової системи. Жодна із запропонованих теорій не є вичерпною; деякі експериментальні факти отримують задовільне пояснення, інші — ні.

Терморецептори ссавців розміщені в шкіряному покриві та на зовнішньому боці язика. Згідно з результатами досліджень, глибина їх розміщення становить 0,28-0,30 мм, а холодкових — 0,10-0,17 мм.

Терморецептори шкіри являють собою модулятори частоти — вони перетворюють певну інтенсивність теплового подразнення в певну частоту електричних імпульсів. Нервові волокна, що йдуть від теплових рецепторів, активні в межах 20-47 °С, причому максимальна частота спостерігається при 38-43 °С; волокна від холодкових рецепторів активні в діапазоні 10-35 °С з максимальною частотою імпульсів близько 25 °С (рис. 2.55,а). У проміжному діапазоні імпульси виникають з боку як теплових, та і холодкових рецепторів; ця ситуація відповідає нейтральному стану, коли не відчувається ні тепло, ні холод. Максимальний сталий розряд теплових рецепторів становить 3,7 імп/с, а холодкових — 10 імп/с.



Раптове підвищення температури шкіри призводить до різкого короточасного посилення частоти імпульсів протягом 1-2 с, після чого відбувається повернення частоти до сталого рівня. Зниження температури також зумовлює збільшення частоти імпульсів (до 140 імп/с) з подальшим встановленням нової частоти імпульсації, вищої, ніж при початковій температурі (рис. 2.55, б, в).

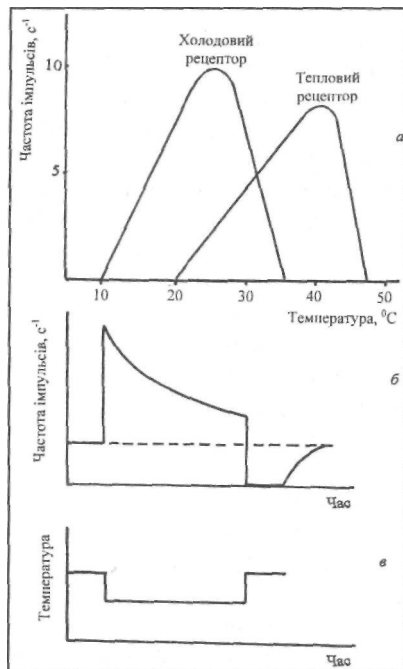


Рис. 2.55. а. Залежність частоти електричних імпульсів, що виникають в холодових і теплових терморецепторах, від температури, б. Часова динаміка частоти імпульсів при зменшенні температури, в. Зменшення температури з часом

68 Гц. Крім того, змія здатна визначати напрямок до джерела тепла. Все це дає можливість їй знаходити в темряві здобич — теплокровну тварину, яка посиляє інфрачервоне випромінювання в межах 10 мкм; спектральна чутливість терморецепторів змії — 0,5-15 мкм.

Цвіркуни і багатоніжки сприймають температуру повітря антенами, а ґрунту — лапками. На антенах терморецептори також у бджоли, сарани, клопів.

### Термотаксис

Живі організми здатні на адаптивну поведінку щодо температурних градієнтів; рух організму у бік джерела температури або від нього називається *термотаксисом*. Нематоди, які паразитують на теплокровних тваринах, переміщуються до більш високих температур. Слимаки також рухаються у бік температури, якій віддається перевага. Селективне накопичення в зонах оптимальних температур спостерігається у риб, рептилій, найпростіших та водоростей. Очевидно, саме термотаксис дає можливість кліщу вароа знаходити бджолу.

### ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ ПОЛЯ

#### Електричні поля природного походження

До складу атмосфери входять іони кисню, азоту та інших газів, а також вільні електрони. В нижній тропосфері кількість іонів обох знаків невелика; близько 500-700 парсм<sup>-3</sup>. Іони виникають в основному за радіоактивного випромінювання урану і радію, що містяться в земній корі. Але ці іони обліплені нейтральними молекулами води і рухомість їх мала. Вільні електрони існують недовго, приєднуючись до інших частинок.

На великих висотах кількість іонів збільшується завдяки впливу космічного випромінювання (протони, електрони, ультрафіолетове випромінювання). Так, на висоті 20-25 км (стратосфера) спостерігається перший максимум іонізації, а саме — близько 10<sup>4</sup> парсм<sup>-3</sup>. Далі концентрація іонів зменшується, але на висоті 30 км (мезосфера) їх кількість становить теж 10<sup>4</sup> парсм<sup>-3</sup>. Причому кількість негативних іонів мала; в основному переважають позитивні іони й електрони. Приблизно з цієї висоти починається *іоносфера* — шар, що відбиває радіохвилі. На висоті 180-200 км склад іоносфери та-

кий: електрони —  $(2-2,5) \cdot 10^5 \text{ см}^3$ ;  $O_2^+$  —  $5 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ ;  $O^+$  —  $9 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ .

Одним з найважливіших факторів, що зумовлює появу електричних полів, є наявність природного джерела енергії — Сонця і зменшення з висотою густини повітря. Сонячне випромінювання викликає іонізацію атмосферних газів. У зв'язку з градієнтом густини повітря рівень іонізації і, відповідно, питомої електропровідності повітря неоднорідний: біля поверхні Землі  $\sigma = 10^{18} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$  і  $10^{17} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$  — на висоті 100 км. Тобто повітря можна розглядати як ізолятор біля поверхні і провідник — у межах мезосфери і вище. Крім того, в тропосфері можуть відбуватися явища, що спричиняють поділ електричних зарядів за зміни метеорологічних умов — хмар, опадів, туманів тощо. В атмосфері виникає позитивний об'ємний заряд, а на поверхні Землі — від'ємний заряд (рис. 2.56 а). Отже, електричне поле Землі спрямоване приблизно вертикально; напруженість його становить від 130 В/м біля поверхні до кількох вольт на метр на висоті 10 км.

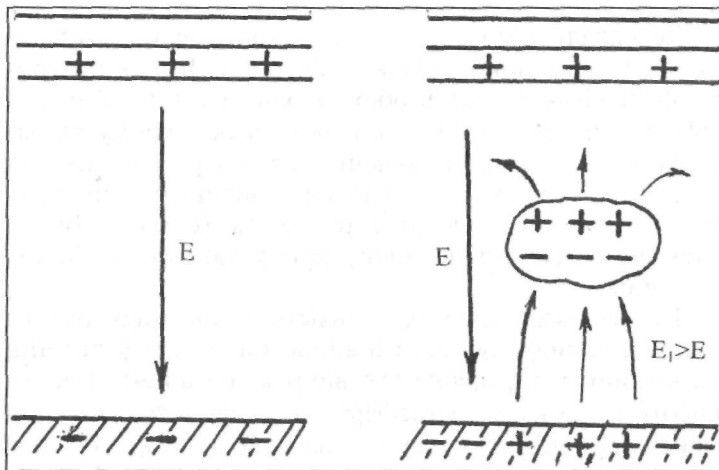


Рис. 2.56. а. Електричне поле, що створюється об'ємним зарядом іонів; б. Вплив грозових хмар на розподіл електричних зарядів

Об'ємний заряд іонів навколо земної кулі утворює електричне поле, що направлено донизу і має напру-

женість близько  $E = 100 \text{ В/м}$  (в ясну погоду). Планета і іоносфера являють собою своєрідний сферичний конденсатор, ізоляційним прошарком якого є повітря. Наявність грозових хмар впливає на розподіл електричних зарядів: хмара має негативно заряджену нижню частину і структура електричного поля змінюється (рис. 2.56 б). Зазначимо, що поле  $E_1 > E$  (оскільки відстань між зарядами менша). Там, де є башти, шогли тощо, виникає коронний розряд — самостійний висковольтний розряд у газі при тискові, більшому, ніж 1 атмосфера, поблизу електродів. Цей коронний розряд у повітрі являє собою *блискавку*. Тривалість блискавки може становити  $< 1 \text{ с}$ , напруга — десятки мільйонів вольт, сила струму — кілька ампер.

#### Вимірювання електричних полів

Методи вимірювання електричних полів в атмосфері можна поділити на три класи:

1. Оцінка напруженості поля за різницею потенціалів між електродами, що містяться у полі;
2. Вимірювання величини заряду, що індукується полем на поверхні провідника:

$$E = 4\pi\sigma, \quad (2.68)$$

де  $\sigma$  — поверхнева густина заряду.

3. Аналіз впливу поля на рух електронів або іонів.

#### Вплив електричних полів на живі організми

Розглянемо екологічні проблеми електропередачі надвисокої напруги. Сучасна енергетика базується на лініях електропередачі (ЛЕП) з напругою 220, 500, 750, і 1150 кВ. Створення двох останніх ліній електропередачі (ЛЕП-750 і ЛЕП-1150) потребує формування санітарно-захисних зон—коридорів завширшки 100—150 м, що обмежує господарську діяльність людини, створює певні екологічні проблеми. Підготовка трас для ЛЕП, вирубування просік, установка опор, монтаж проводів

і подальша експлуатація ЛЕП зумовлюють відповідну реакцію з боку екосистем. Вирубання лісу призводить до значної перебудови всього комплексу кліматичних факторів: на просіках зростає швидкість вітру, змінюється температура і вологість повітря; влітку збільшується кількість посушливих днів, що небезпечно для сходів; різко зростає випаровування вологи з поверхні ґрунту і трав'яного покриву, що спричиняє пересихання приповерхневих шарів ґрунту; взимку на просіках надмірно накопичується волога, що сприяє вегетації рослин навесні; збільшується приплив сонячного випромінювання в зоні просік. Розмерзання і відтавання ґрунту на просіках відбувається на 7-30 днів раніше, ніж у лісі. Це призводить до зменшення водопроникності ґрунту, збільшення поверхневих стоків і ерозійних процесів. Внаслідок цього відбуваються значні перебудови фізико-хімічної і біологічної структури ґрунтового покриву. Будівництво й експлуатація ЛЕП зумовлює незворотні зміни у видовому складі, фітомасі, просторовій і часовій структурі рослинності на просіках, особливо в зонах тундри, лісотундри і північної тайги. Відновлення рослинного покриву відбувається вкрай повільно, що сприяє ерозійним процесам. Створення просік супроводжується також значними змінами тваринного компонента екосистем: зникають тварини, що живуть у кронах дерев; змінюється видовий склад, чисельність і різноманіття птахів; збільшується концентрація гризунів. Без сумніву, впливають ЛЕП й на людський організм. Розростання міст до мегаполісів зумовлює наближення ЛЕП до новобудов. Тимчасом допустимі норми електричного поля не повинні перевищувати 1 кВ/м; для цього слід віддаляти опори ЛЕП на 30+40 метрів від житлових кварталів.

Електромагнітне поле установок високої напруги істотно впливає на людину, викликаючи неприємні враження, а іноді — нервово-фізіологічні порушення. Механізм цих явищ пов'язаний з появою наведеного в людському організмі електричного струму. При частоті 50 Гц мінімальний струм, який відчуває людина, становить 1 мА. Вплив електричних полів промислової

частоти залежить від напруженості і часу перебування в них.

У табл. 2.9 наведено максимально дозволені для населення рівні електромагнітних випромінювань, в таблиці 2.10 — стандарти електромагнітних випромінювань для виробничих умов. Нагадаємо, що типові значення напруженості електричного поля становлять для: повітряних ЛЕП — 5,5+2,5 кВ/м; електричних розподільних станцій — 2,5+6 кВ/м.

## 2.9. Дозволені рівні електромагнітних випромінювань для населення

<i>Частота</i>	<i>Рівень, В/м</i>
50 Гц	5-Ю <sup>2</sup>
30-300 кГц	20
0,3-3 МГц	10
3-30 МГц	4
30-300 МГц	2

## 2.10. Дозволені рівні електромагнітних випромінювань для виробничих умов

<i>Частота</i>	<i>Рівень, В/м</i>
50 Гц	5-Ю <sup>2</sup>
60кГц-3 МГц	50
3-30 МГц	20
30-50 МГц	10
50+300 МГц	5

Крім того, джерелами електромагнітних полів є радіолокаційні станції, системи радіозв'язку і телебачення, промислові установки термообробки матеріалів, отримання плазми, медичні прилади. Так, напруженість у будинку на вул. Корольова, поблизу Останкінської телебашти в Москві, дорівнює 4+8 В/м при гранично допустимому рівні 2 В/м. Гранично допустимі норми радіочастотних полів наведено в табл. 2.11.

## 2.11. Гранично допустимі норми радіочастотних полів

Діапазон хвиль	Частотні границі	Допустимий рівень, В/м
Довгі	30+300 кГц	20
Середні	0,3-3 МГц	10
Короткі	3+30 МГц	4
УКХ	30+300 МГц	2

Згідно з накопиченими даними, вплив електромагнітних полів на людину призводить до погіршення здоров'я, викликаючи зрушення в функціонуванні серцево-судинної, ендокринної, гематологічної, імунної систем, а також збільшує ризик розвитку онкопатології.

Для риб характерні певні реакції на зовнішні електричні поля. Під час ввімкнення джерела поля риба демонструє рухому реакцію: із збільшенням напруженості поля вона намагається вийти із зони його дії; при подальшому підвищенні напруженості риба наближається до анода (так званий *гальванотаксис*). Змінні електричні поля зумовлюють *осцилотаксис* — розміщення риби впоперек силових ліній поля. Реакція риб на імпульсні електричні поля залежить від амплітуди, частоти і тривалості імпульсів.

Личинки американського вугра *Anguilla rostrata* мігрують з районів нересту в Саргасовому морі до північноамериканського узбережжя Атлантичного океану на відстань близько 1000 км. Цілком можливо, що при цьому вони використовують для навігації геоелектричні поля, створювані в океані течіями (такими як Гольфстрім). Нагадаємо, що напруженість таких полів становить 0,5 мкВ/см, а чутливість вугра — 0,002 мкВ/см.

Планарії здатні визначати наявність і відрізнити географічний напрямок горизонтальних електростатичних градієнтів, що не перевищують 0,1 мкВ/см.

Бджоли виявляють здатність реагувати на зовнішні електричні поля. Максимум чутливості бджолоїної сім'ї, що складається з 10000 особин, на електричні поля становить 4+5 В/см. Під впливом електричних полів відбувається зміна параметрів мікроклімату всередині вулика.

## ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ

Процес отримання живим організмом через чутливі органи біологічно значущої інформації про природні електричні поля або поля біологічного походження називається *електрорецепцією*.

Електрорецепція використовується тваринами для пошуків здобичі, уникнення хижаків, внутрішньовидової комунікації, розмноження, просторової орієнтації і навігації, попередження щодо природних явищ — землетрусів, штормів, ураганів тощо.

Серед 4,5 тисяч видів ссавців електрорецепцію знайдено лише в одного качконоса *Ornithorhynchus anatinus*. Дзьоб тварини вкритий шкірою; в протоці шкіряної слизової залози дзьоба містяться електрорецептори. Слиз запобігає висиханню електрорецепторних клітин під час виходу тварини на сушу, а в воді завдяки низькому опору забезпечує підведення електричного струму до рецепторних клітин. Електрочутливість качконоса становить 50+80 мкВ/см.

Риби живуть у водному середовищі, що характеризується високою електропровідністю; саме риби здатні створювати електричні поля й розпізнавати об'єкти у воді. Можна поділити риб на таких, які мають електрорецепторні системи і сприймають електричні поля, і таких, які їх не мають. Електрорецепторні системи виявлено у сомових риб, акул і скатів. Мембрана електрорецепторної клітини спрямована до зовнішнього середовища і має менший електричний опір, ніж мембрана на базальному боці клітини. Струм, що входить в клітину ззовні, викликає деполяризацію мембрани, яка активізує кальцієві канали в цій частині клітини. Результатом цього є збільшення частоти нервових імпульсів у сенсорному волокні, що зв'язане з рецептором. Чутливість риб, які мають електрорецептори, варіює від 0,01+0,02 мкВ/см в акул і скатів до 1+2 мкВ/см у гімнотидів та мормирідів.

Хоча електрорецепторів у комах поки що не виявлено, можна казати про універсальність механізмів сприймання ними електричних полів. Проаналізуємо існуючі припущення. Згідно з однією із гіпотез, у про-

цесі електростатичної індукції у тканинах комах (які мають опір  $10^2$ - $10^3$  Ом) відбувається перерозподіл зарядів. Електричні струми, що виникають при цьому, достатні для сприймання нервовою системою. Інша теорія припускає нагромадження на екзоскелеті комахи під час механічних взаємодій з навколишнім середовищем електричних зарядів; завдяки електростатичній взаємодії, що виникає при цьому, можуть відбуватися механічні деформації окремих структурних елементів. Так, антени бджоли притягуються до заряджених тіл, і вона змушена відводити ці органи. Кут відхилення залежить від величини заряду. Під впливом електромагнітних полів антени здійснюють коливання, амплітуда яких залежить від параметрів поля.

#### Магнітне поле Землі

Природне силове поле, виникнення якого зумовлене джерелами, що містяться в Землі і навколоземному просторі, називається *магнітним полем Землі*. Магнітне поле діє на електричні заряди, що рухаються, і тіла, які мають магнітний момент. Характеризуються магнітні поля вектором *магнітної індукції*  $B$  і *напруженістю магнітного поля*  $H$ , що пов'язані співвідношенням:

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (2.69)$$

де  $\mu$  — магнітна проникність;  $\mu_0$  — магнітна стала.

Одиниці вимірювання магнітної індукції — *тесла* [Тл]; напруженості магнітного поля — *ампер на метр* [А/м].

Магнітне поле Землі має постійну (= 99%) і змінну (= 1%) складові. Це поле за формою нагадує поле диполя, центр якого зміщений відносно центра Землі, вісь нахилена до осі обертання Землі на  $11,5^\circ$ , причому в північній напівкулі міститься південний полюс магнітного поля. Середня величина магнітної індукції поблизу земної поверхні становить  $-5 \cdot 10^{-5}$  Тл, а напру-

женість магнітного поля спадає від магнітних полюсів (55,7 А/м) до магнітного екватора (33,4 А/м).

Магнітне поле Землі утворює *магнітосферу* — область навколоземного простору, заповнену частинками, що рухаються в магнітному полі Землі. Магнітосфера простягається на 70÷80 тис. км у напрямку до Сонця і на багато мільйонів кілометрів у протилежному напрямку.

#### Методи вимірювання магнітних полів

1. *Магнітостатичний магнітометр*. Використовується постійний магніт, підвішений на пружній нитці. При зміні зовнішнього магнітного поля магніт обертається, кут його обертання реєструється оптичним методом.

2. *Індукційний магнітометр*. Принцип роботи ґрунтується на вимірюванні електрорушійної сили у витках провідника під час зміни діючого на нього магнітного потоку ( *явище електромагнітної індукції* ):

$$E = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.70)$$

де  $\Phi$  — магнітний потік.

3. *Квантові магнітометри*:

а. *Протонно-прецесійний магнітометр*. Протони (атомні ядра) мають масу, електричний заряд, механічний момент кількості руху  $\vec{p}$  і магнітний момент  $\vec{\mu}$ . Зовнішнє магнітне поле намагається орієнтувати ядра так, щоб власні магнітні моменти повернулись уздовж цього поля. Оскільки механічний момент заважає цьому, відбувається прецесія ядер з частотою

$\omega = \frac{\vec{\mu}}{\vec{p}} \cdot |\vec{H}|$ . Вимірювання частоти прецесії дає можливість оцінити магнітне поле.

б. Магнітометр з оптичною орієнтацією атомів. В основі методу ефект Зеемана — розщеплення рівнів енергії атома у магнітному полі. Оцінку магнітного поля здійснюють через вимірювання частоти переходу між рівнями.

в. Магнітометр на основі дії сили Лоренца  $F_L$ , яка діє на електричний заряд  $q$ , що рухається в магнітному полі  $B$ , і дорівнює величині заряду, помноженому на векторний добуток його швидкості  $V$  і магнітної індукції  $B$

$$\vec{F}_L = q [\vec{V} \times \vec{B}]. \quad (2.71)$$

г. Магнітометр на основі ефекту Холла, в основі

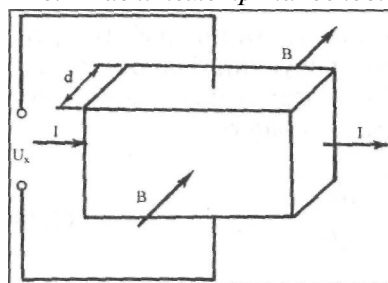


Рис. 2.57. Ефект Хома:

$I$  — електричний струм;

$B$  — магнітна індукція;

$U_x$  — різниця потенціалів

якого лежить вимірювання різниці потенціалів  $\Delta\varphi$ , що виникає у провіднику зі струмом, розміщеному у магнітному полі. Ця різниця потенціалів вимірюється перпендикулярно до напрямків електричного струму і магнітного поля (рис. 2.57) і визначається за формулою:

$$\Delta\varphi = R_x \frac{I \cdot B}{d}, \quad (2.72)$$

$I$  — електричний струм;  $B$  — магнітна індукція;  
 $d$  — товщина провідника;  $R_x$  — стала Холла.

#### Вплив магнітних полів на живі організми

Під впливом корпускулярних потоків Сонця відбуваються короточасні зміни магнітного поля Землі — так звані *магнітні бурі*, що супроводжуються стиском

магнітосфери, посиленням у ній електричних струмів і виникненням на поверхні Землі ірегулярних магнітних збурень. Протягом магнітних бур збільшується кількість серцево-судинних захворювань, погіршується стан хворих на гіпертонію тощо. Крім того, магнітні бурі викликають полярні саява, іоносферні збурення, рентгенівське та низькочастотні випромінювання.

Лінії електропередач є джерелами не тільки електричних, але й магнітних полів. У 90-х роках вчені Швеції, Данії, США здійснили масштабні епідеміологічні дослідження, що засвідчили: вплив магнітних полів ЛЕП на здоров'я людей може проявитися в коридорах завширшки 400-800 м уздовж ліній електропередач. У 1996 р. величина індукції магнітного поля в 0,2 мкТл була рекомендована як гранично допустимий рівень магнітного поля промислової частоти. Перевищення цієї норми призводить до раку крові і мозку. Наприклад, діти віком до 15 років в 2,7 раза частіше захворюють на лейкемію, якщо перебувають у магнітному полі, магнітна індукція якого перевищує 0,2 мкТл і в 3,8 раза частіше, якщо магнітна індукція перевищує 0,3 мкТл.

Високу магнітну активність демонструє вільшанка, яка використовує геомагнітне поле для орієнтування під час міграції. Реагують на магнітні поля також голуби і чайки.

Експериментальні дослідження з равликами і планаріями показали, що тварини здатні реагувати на близькі за величиною до геомагнітного поля магнітні поля. Так, планарія *Dugesia*, коли віддаляється від джерела світла, завжди відхиляється від прямолінійної траєкторії; величина і напрям відхилення залежить від орієнтації і напруженості зовнішнього магнітного поля. Чутливість планарії до магнітного поля становить  $4 \cdot 10^{-6}$  Тл. Равлик *Nassarius* відрізняє полюси магніту.

Печерна саламандра здатна знаходити шлях у цілковитій темряві, орієнтуючись за магнітним полем.

Магнітне поле Землі використовують бджоли для орієнтації. Магнітна орієнтація проявляється у бджіл у процесі будівництва нових стільників роєм. Можна

стверджувати про амплітуди 1+10 нТл, які відповідають чутливості бджіл до магнітних полів.

## МАГНІТОРЕЦЕПЦІЯ

Здатність живих організмів сприймати та використовувати зовнішні магнітні поля називається *магніторецепцією*. На сучасному рівні найвірогіднішою є гіпотеза магніторецепції, що ґрунтується на властивостях *магнетиту* — специфічної нерганічної сполуки заліза (оксиди, сульфати, сульфіді і фосфати заліза). У тварин основною сполукою заліза, що відповідає за магніторецепцію, є феригідрит  $5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$ ; у бджіл —  $Fe_3O_4$ . Магнетит знайдено у голубів, пелагічних китів, деяких молюсків та бактерій, що живуть у мулі. Мінімальна структурна одиниця магнетиту з постійними магнітними властивостями називається *доменом*. Уміщений у магнітне поле, цей домен проявляє себе як стрілка компаса, орієнтуючись уздовж поля. Цілком можлива сумарна орієнтація всіх доменів при накладанні зовнішнього магнітного поля (так званий *суперпарамагнетизм*).

## СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

### Параметри сонячного випромінювання

Сонце являє собою розжарену кулю діаметром  $1,4 \cdot 10^6$  км, маса якої становить  $1,985 \cdot 10^{33}$  г. Відстань між Сонцем і Землею дорівнює 149598 тис. км. Склад сонячного середовища — водень (64%), гелій (32%) і суміш важких елементів (4%). Температура Сонця у центрі —  $2 \cdot 10^7$  °С, на поверхні — 6000 °С. За такої високої температури відбувається іонізація молекул сонячного середовища та ядерні реакції. Ці процеси супроводжуються виділенням великої кількості енергії. Щорічна енергія Сонця, що приймається Землею, становить  $5,5 \cdot 10^{24}$  Дж; потужність —  $1,510^{18}$  кВт за годину. Сонце можна порівняти з абсолютно чорним тілом, температура якого дорівнює 6000К. Спектральна густина сонячного випромінювання становить

200+5000 нм; максимум випромінювання припадає на 500 нм. Спектр сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні складається з ультрафіолетової (200+400 нм), видимої (400+700 нм) та інфрачервоної (більше 700 нм) частин. На ультрафіолетову частину спектра припадає 5%, на видиму 35% і на інфрачервону — 60% сонячного випромінювання.

Ультрафіолетова частина спектра ділиться на вакуумну (100+200 нм) далеку (200+300 нм) і ближню (300+400 нм) області. В літературі використовується ще одна класифікація ультрафіолетового випромінювання з точки зору його впливу на біологічні об'єкти:

**УФ-С** область (200+280 нм) — випромінювання цієї області надзвичайно згубно впливає на живі організми;

**УФ-В** область (280+320 нм) — випромінювання цієї області справляє специфічний, не завжди руйнівний вплив на живі організми;

**УФ-А** область (320 + 390 нм) — випромінювання цієї області найбезпечніше для живих організмів.

Сонячне випромінювання розподіляється у такий спосіб:

1. Близько 17% поглинається хмарами, водяною парою, двоокисом вуглецю, що сприяє безпосередньому нагріванню атмосфери.

2. Майже 30% відбивається від хмар, атмосферних газів та частинок.

3. Близько 53% досягає земної поверхні: дві третини у вигляді прямого сонячного світла, одна третина — у вигляді розсіяного світла.

Середня інтенсивність сонячного випромінювання варіює від 250 Втм<sup>-2</sup> для субтропічних пустель до 80 Втм<sup>-2</sup> для полярних районів. Уночі інтенсивність дорівнює

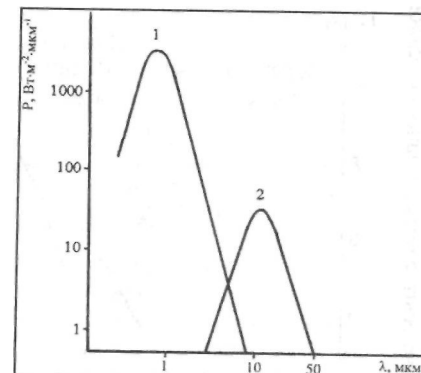


Рис. 2. 58. Спектри випромінювання: Сонця; 2 - земної поверхні

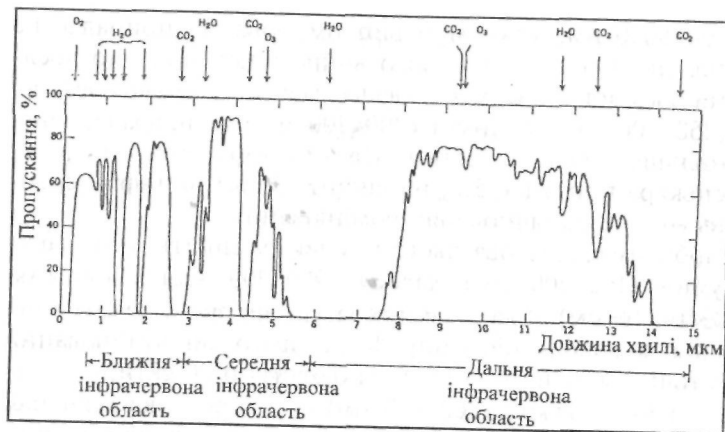


Рис. 2.59. Пропускання атмосфери на рівні 1820 м над рівнем моря

нулю, а вдень короткий проміжок часу в ясну погоду становить  $1368 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  (сонячна стала). В Україні інтенсивність сонячного випромінювання варіює від  $115 \div 145 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  на Поліссі до  $185 \div 215 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  в Криму.

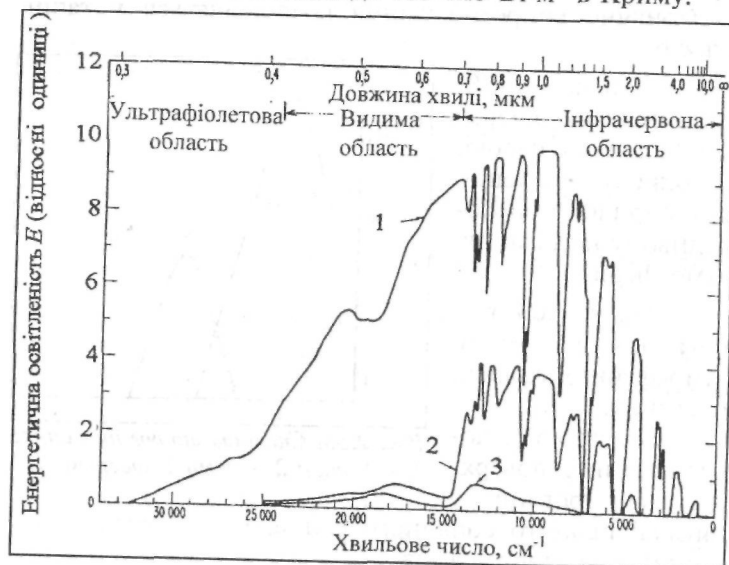


Рис. 2.60. Спектри сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні (1); відбивається від неї (2) та від хмар (3)

Земна поверхня діє як абсолютно чорне тіло з температурою  $288\text{K}$ . Спектральна область випромінювання становить  $4 \div 50 \text{ мкм}$  з максимумом  $10 \text{ мкм}$  (рис. 2.58). В атмосфері утворюються своєрідні спектральні «вікна прозорості», через які випромінювання спроможне проходити у космос (рис. 2.59). Додатково атмосферні гази  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_3$  відбивають сонячне випромінювання, спрямовуючи його також у космос. Спектри сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, відбивається від неї та від хмар, наведено на рис. 2.60.

### Баланс сонячного випромінювання

Сумарні постачання та втрати тепла  $R_n$  земною поверхнею (рис. 2.61) визначаються на основі рівняння балансу:

$$R_n = I(1 - a) + R_d - \varepsilon \sigma T^4, \quad (2.72)$$

де  $I$  — сонячне випромінювання на земній поверхні ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ );  $a$  — альbedo для короткохвильового випромінювання (безрозмірна величина);  $R_d$  — випромінювання, що надходить з атмосфери ( $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ );  $\sigma$  — стала Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ );  $T$  — температура земної поверхні (K);  $\varepsilon$  — випромінювальна здатність земної поверхні (безрозмірна величина). Тут  $I = (1 - a)$  характеризує сонячне випромінювання, де  $a$  — альbedo — визначає частину відбитого сонячного випромінювання. Величина  $a$  залежить від природи поверхні.

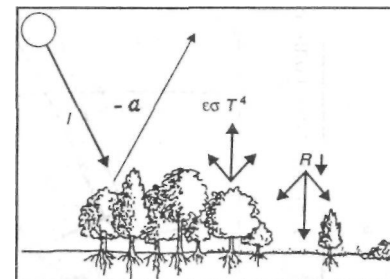


Рис. 2.61. Сумарні постачання та втрати тепла земною поверхнею:  $I$  — сонячне випромінювання, що падає;  $a$  — частка відбитого випромінювання (альbedo);  $\varepsilon \sigma T^4$  — довгохвильове випромінювання земної поверхні;  $R_d$  — довгохвильове випромінювання повітря

а) характеризує сонячне випромінювання, де  $a$  — альbedo — визначає частину відбитого сонячного випромінювання. Величина  $a$  залежить від природи поверхні.



2.12. Значення альбедо  $a$  і випромінювальної здатності  $\epsilon$

Поверхня	$a$	$\epsilon$
Грунти	0,05-0,40	0,90-0,98
Пісок	0,20-0,45	0,84-0,91
Трава: довга (ї м)	0,16	0,90
коротка (0,02 м)	0,26	0,95
Сільськогосподарські угіддя	0,18-0,25	0,90-0,99
Ліси	0,05-0,15	0,97-0,99
Вода	0,10-1,00	0,92-0,97
Сніг	0,40-0,95	0,82-0,99
Лід	0,33-0,45	0,92-0,97

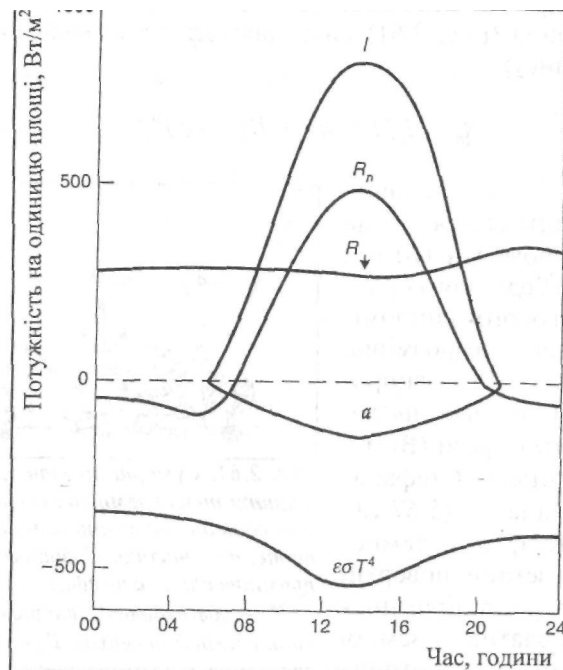


Рис. 2.62. Процес теплового балансу трав'яної поверхні протягом доби ( $R_n$  — сумарне випромінювання)

$R_↓$  визначає нагрівання земної поверхні довгохвильовим випромінюванням від хмар, водяної пари, дво-

окису вуглецю, озону аерозолей. Значення альбедо  $a$  і випромінювальної здатності  $\epsilon$  наведено в табл. 2.12. Процес теплового балансу протягом доби подано на рис. 2.62.

#### Методи вимірювання сонячного випромінювання

**Термоелектричні методи.** В основі більшості приладів для вимірювання сонячного випромінювання лежать термоелектричні явища, що відбуваються в термопарах. Залежно від інтенсивності сонячного випромінювання між спаями термопар виникає термоелектрорушійна сила і електричний струм, які вимірюють. Розрізняють такі прилади:

1. **Актинометр термоелектричний.** Чутливим елементом є послідовно спаяні стрічки манганіну і константану, складені у вигляді зірочки (рис. 2.63).

2. **Піранометр.**

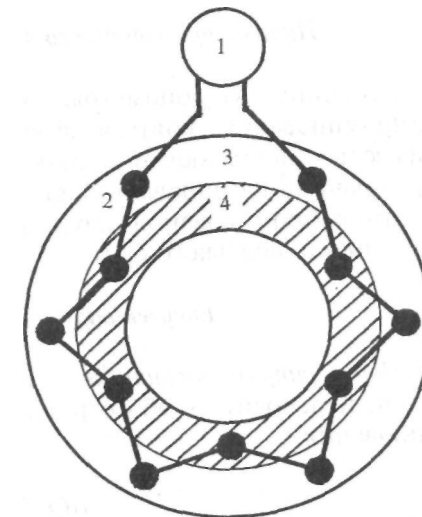
Складається з термопар, розмішених у горизонтальній площині. Парні термоспаї пофарбовано чорною фарбою, непарні — білою.

3. **Альбедометр.** Якщо чутливі елементи (приймач) спрямувати донизу, прилад буде реєструвати відбите випромінювання, тобто оцінювати альбедо.

4. **Балансометр.**

Складається з двох приладів. 2.63. Актинометр: 1 — вимірювальний прилад; 2 — термопари; 3 — світла ділянка, що освітлюється донизу. Таким чином можна оцінити різницю між потоками випромінювання згори і знизу.

Перевагою термоелектричних приймачів є їх здатність давати відліки в будь-якій ділянці спектра з по-



стійною чутливістю. Прилади характеризуються високою лінійністю і дають відлік в абсолютних одиницях. До недоліків слід віднести невисоку чутливість і велику інерційність.

**Піроелектричні методи.** Суть цих методів полягає в використанні залежності поляризації піроактивного кристалу від зміни його температури при опромінюванні. Активною речовиною є сегнетоелектрики. Піроелектричні прилади характеризуються швидкодією, високою чутливістю і великим діапазоном енергії, що вимірюється.

**Фотоелектричні методи.** Принцип дії цих приладів полягає в перетворенні енергії оптичного випромінювання в електричну завдяки зовнішньому (фотоелектронні помножувачі) або внутрішньому (фотодіоди) фото ефекту.

### Параметри сонячного випромінювання

Величини, за допомогою яких оцінюють оптичне випромінювання, діляться на *енергетичні* (що характеризують випромінювання безвідносно до його дії на приймачі випромінювання) та *світлові* (що характеризують випромінювання щодо умовного приймача — середнього людського ока).

### Енергетичні величини

**Потік випромінювання  $\Phi_e$**  — потужність, що посиляється, переноситься або отримується у вигляді випромінювання:

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt}, \quad (2.73)$$

де  $Q$  — енергія випромінювання.

Одиниця потоку випромінювання — *ват* [Вт].

Сила випромінювання  $I_e$  — відношення потоку випромінювання, що виходить із джерела або елемента джерела в даному напрямку, усередині елементарного

тілесного кута, який містить даний напрямок, до цього елементарного тілесного кута:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{dt}. \quad (2.74)$$

Одиниця сили випромінювання — *ват на стерadian* [Вт/ср].

**Енергетична яскравість  $L_e$**  — в точці поверхні і в заданому напрямку відношення сили випромінювання елемента поверхні до площі ортогональної проєкції цього елемента на площину, перпендикулярну до цього напрямку:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (2.75)$$

де  $dS$  — площа елемента поверхні, що випромінює;  $\alpha$  — кут, що визначає напрямок випромінювання.

Одиниця енергетичної яскравості — *ват на стерadian — квадратний метр* [Вт/ср·м²].

**Енергетична освітленість  $E_e$**  в точці поверхні — відношення потоку випромінювання, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (2.76)$$

Одиниця енергетичної освітленості — *ват на квадратний метр* [Вт/м²].

**Енергетична світність  $M_e$**  в точці поверхні — відношення потоку випромінювання, що виходить з елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (2.77)$$

Одиниця енергетичної світності — *ват на квадратний метр* [Вт/м²].

### Світлові величини

Світловий потік  $\Phi_e$  — при нерівномірному розподілі випромінювання у просторі світловий потік у тілесному куті  $\omega$  визначається як:

$$\Phi_e = \int I_e \cdot d\omega, \quad (2.78)$$

а при рівномірному посиленні світла в тілесному куті світловий потік визначається як:

$$\Phi_e = I_e \cdot \omega, \quad (2.79)$$

де  $I_e$  — сила світла.

Одиниця світлового потоку — люмен [лм].

Сила світла  $I_e$  визначається як:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}, \quad (2.80)$$

Одиниця сили світла — кандела [кд] = [лм/ср].

Яскравість  $L_e$  у точці поверхні і в даному напрямку — відношення інтенсивності світла елемента поверхні до площі ортогональної проекції цього елемента на площину, перпендикулярну до даного напрямку:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad (2.81)$$

де  $dS$  — площа елемента поверхні, що випромінює;  
 $\alpha$  — кут, що визначає напрямок випромінювання.

Одиниця яскравості — кандела на квадратний метр [кд/м²].

Освітленість  $E_e$  в точці поверхні — відношення світлового потоку, що падає на елемент поверхні, до площі цього елемента:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (2.82)$$

Одиниця освітленості — люкс [лк] = [лм/м²].

Світність  $M_e$  в точці поверхні — відношення світлового потоку, що виходить з елемента поверхні, до площі цього елемента:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}.$$

Одиниця світності — люмен на квадратний метр [лм/м²].

### Парниковий ефект

На межі XIX—XX ст. шведський вчений С Ареніус передбачив можливість нагромадження в атмосфері вуглекислого газу, що може призвести до підвищення температури нижніх шарів атмосфери. Нинішній досвід свідчить, що внаслідок господарської діяльності людини в атмосфері збільшується вміст вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ), галогенопохідних вуглеводнів і тропосферного озону ( $\text{O}_3$ ). Так, наприклад, атмосферні запаси  $\text{CO}_2$  ще в 1860 р. становили 610 Гт (1 Гт =  $10^9$  тонн), а в 1995 р. — вже 760 Гт. Оцінки дають приблизну цифру — 3 Гт/рік — швидкості зростання вмісту  $\text{CO}_2$  в атмосфері. Отже, в кінці XXI ст. вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері подвоїться порівняно з серединою XIX ст.

Метан потрапляє в атмосферу за діяльності мікроорганізмів у болотистих ґрунтах або в системах травлення трав'янистих тварин, а також при спалюванні палива, сміття, при добуванні вугілля.

Закис азоту надходить за діяльності мікроорганізмів у ґрунті й воді, внаслідок виробництва і застосування азотних добрив у сільському господарстві.

Специфічною рисою цих газів є те, що вони поглинають оптичне випромінювання в інфрачервоній області спектра. Справа в тому, що сонячне випромінювання є короткохвильовим, тоді як випромінювання

земної кулі — довгохвильовим. Сонячне випромінювання проникає крізь атмосферу і нагріває земну поверхню. Теплове довгохвильове випромінювання Землі поглинається атмосферними газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ), що спричиняє *парниковий ефект* — нагрівання приповерхневого шару атмосфери. Внаслідок цього порушується тепловий баланс; цілком імовірним є підвищення глобальної температури поверхні Землі за зміни концентрації парникових газів, що може призвести до зміни клімату. Згідно з рекомендаціями Міжнародної конференції «Роль двоокису вуглецю та інших газів, що викликають парниковий ефект, у змінах клімату і пов'язаних із ними діях» (Австрія, 1985), підвищення середніх температур негативно впливає на врожаї пшениці і кукурудзи в зернових областях середніх широт Північної Америки й Західної Європи. Так, при сучасній технології сільського господарства і сучасному складі зернових культур потеплення на 2 кельвіни при незмінній кількості опадів може призвести до зниження врожаю у середньому на 10+7 %. Крім того, підвищення температури зумовить танення полярного льоду і підвищення рівня Світового океану. А це, в свою чергу, призведе до затоплення територій, збільшенню тривалості сезонного відтавання ґрунтів, погіршення лісових масивів, розташованих у межах вічної мерзлоти.

### *Озонова діра*

Основна маса озону атмосфери міститься в *озоносфері* на висоті 10+50 км з максимумом на висоті 20+25 км. Вміст його становить  $3,3 \cdot 10^9$  т. Короткохвильове (<270 нм) ультрафіолетове випромінювання здатне розщепити молекулу кисню  $\text{O}_2$  на синглетний кисень  $\text{O}$ , що взаємодіє з  $\text{O}_2$  і утворює озон  $\text{O}_3$ . В цілому, озоновий шар являє собою ефективний фільтр для сонячного ультрафіолетового випромінювання в ділянці 280+320 нм.

*Озонова діра* утворюється в шарі стратосферного озону, що дуже чутливий до впливу різних сполук, які містять хлор, навіть при незначних концентраціях останнього. В 1957 р. було встановлено озонову діру над

Антарктидою; у 1992 р. виявили зменшення вмісту озону в середніх та високих широтах на 20%; у 1994 р. зафіксовано гігантську озонову аномалію від Північного Льодовитого океану до Криму. Зменшення озонового шару тут становить 10+15, а в окремі місяці — 20+30%. У 1991 р. відбулося виверження вулкана Піна-тубо на Філіппінах, що супроводжувалося викидом понад двох мегатон сірчаних сполук. Цілком можливо, що саме ці сполуки спричинили різке зменшення озонового шару. Взагалі відносно механізму утворення озонової дірки нема єдиної думки. Існують дві версії щодо причин виникнення цього явища. Одні вчені вважають, що озоновий шар руйнується внаслідок ослаблення потоку ультрафіолетового випромінювання, необхідного для утворення озону, в кінці року; тут певну роль відіграють швидкі переміщення великих повітряних мас над Антарктидою. Інші твердять, що озоновий шар руйнується через потрапляння в атмосферу хлорфторвуглеців (фреонів), використовуваних як холодоагенти та розпилювачі в холодильних установках, вогнегасниках, аерозольних виробках. Характерним є досить тривалий (від 70 до 500 років) проміжок часу існування цих сполук; поширюючись у повітряному просторі, вони руйнуються під впливом сонячного випромінювання, виділяють атоми хлору чи бром, що взаємодіють із молекулами озону, руйнуючи останні. У зв'язку з цим 1985 р. було прийнято Віденську конвенцію із захисту озонового шару, а в 1987 р. у Монреалі підписано міжнародний протокол щодо речовин, які руйнують озоновий шар. У 1988 р. Україна приєдналася до Віденської конвенції, підписала доповнення та поправки до Монреальського договору. У нас нині працює мережа станцій спостереження за озоновим шаром. Глобальні вимірювання рівня озону за допомогою супутників протягом 1979—1993 рр. свідчать про істотне збільшення ультрафіолетового випромінювання у високих і середніх широтах обох напівкуль. Зменшення озонового шару тривало до 1998 р., після цього очікується його поступове відновлення.

Розглянемо екологічні наслідки вичерпання озону. Зменшення кількості озону в атмосфері сприяє біль-

шому проникненню ультрафіолетового випромінювання на земну поверхню, що є високоенергетичною компонентою сонячного випромінювання і призводить до певних впливів на живі організми та якість повітря.

Збільшення інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, без сумніву, впливатиме на стан і здоров'я людини. Зростає вірогідність руйнування рогової оболонки ока, катаракти, еритеми, раку шкіри, меланом, ослаблення імунної системи.

Реакція рослин на ультрафіолетове випромінювання звичайно варіює у різних видів. Узагалі рослини мають властивість протидіяти впливу цього випромінювання, але можна з впевненістю казати, що їх ріст при цьому пригнічується. Крім того, спостерігаються зміни форми, розподілу біомаси за окремими частинами рослини тощо. Всі ці ефекти впливатимуть на екосистеми, оскільки змінюють рослинний баланс, рівень рослинних патогенів, біогеохімічні цикли.

Збільшення сонячного ультрафіолетового випромінювання призводить до зменшення продуктивності аквасистем. Більш того, океани відіграють істотну роль у постачанні тепла — морський фітопланктон є основним постачальником в атмосферу двоокису вуглецю. Саме ультрафіолетове випромінювання впливатиме на розподіл фітопланктону. Слід також пам'ятати про залежність здатності водних організмів орієнтуватися і рухатися від рівня ультрафіолетового опромінення. Зміни в розвитку рибної молоді, креветок, крабів, амфібій, ослаблення репродукційної здатності, пригнічення личинок — усе це призводить до істотного зменшення розмірів популяцій водних організмів.

Зменшення рівня стратосферного озону і відповідне збільшення ультрафіолетового випромінювання, що проходить крізь нижні шари атмосфери, призводить до збільшення швидкості дисоціації газів, які відповідають за хімічні реакції в тропосфері. Це насамперед озон  $O_3$  та перекис водню  $H_2O_2$ , що значно впливають на здоров'я людини, наземні рослини та різні матеріали. Зміни концентрації гідроксильних радикалів  $OH$  призводять до скорочення часу життя таких кліматично важливих газів як метан  $CH_4$  та таких сполук як  $HCFC$  та

$HFC$ . Отже, ультрафіолетове випромінювання, без сумніву, впливає на якість атмосферного повітря.

### Сонячна активність

Як довів видатний вчений сучасності О.Л. Чижевський (1897—1964), для органічного світу Землі істотними є як сонячна енергія, так і періодичні зміни сонячної активності. Сонце, а також плями та протуберанці, що виникають на його поверхні, являють собою джерела електромагнітного випромінювання, які впливають на магнітне поле Землі та на рівень іонізації земної атмосфери. Потoki заряджених частинок, що надходять від Сонця, спричиняють магнітні бурі на Землі. Крім того, Сонце, як це доведено дослідженнями вченого, посилює назрівання й поширення деяких захворювань на Землі (холери, грипу, дифтерії, чуми, менінгіту, черевного тифу, малярії тощо). Виявлено, що життєві функції патогенних мікроорганізмів безпосередньо зв'язані з полями фізичної природи, що генеруються Сонцем.

Порівнюючи статистичний матеріал про грипозні епідемії з результатами спостережень за сонячною активністю, О.Л. Чижевський одержав гідну подиву відповід-

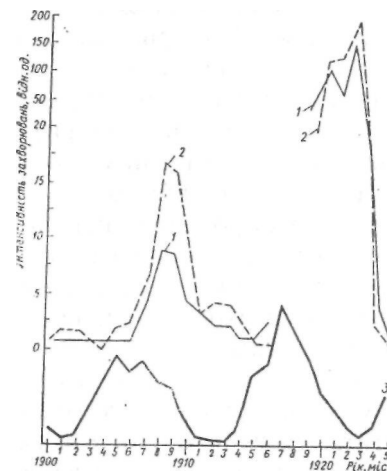


Рис. 2.64. Кореляція кривих захворювання поворотним тифом у Росії й Україні (з 1899 по 1925 р.) та сонячної активності

Аналогічну кореляцію було виявлено при порівнянні кривих захворювання поворотним тифом у Росії й Україні (з 1899 по 1925 р.) та сонячної активності (рис. 2.64). О.Л. Чижевський дійшов висновку, що в роки під-

вищеної діяльності Сонця епідемії чуми мають більшу вірогідність виникнення і поширення, ніж у роки невисокої сонячної активності. Автор застерігає вважати Сонце причиною епідемій на Землі — світло може бути лише другорядним фактором їх появи. Діяльність Сонця слід розглядати як регулятор епідемій у часі.

Факти нашого повсякденного життя свідчать про вплив сонячного випромінювання на стан і здоров'я живих істот, а саме — на функції нервової системи, процеси дихання й кровообігу тощо. Все це ще раз підтверджує достовірність наукових гіпотез О.Л. Чижевського.

#### Фотосенсибілізація

У 1900 р. Оскар Рааб вивчав вплив дії світла та акридинових барвників на життєдіяльність найпростіших (*Paramecium*). Він помітив, що ні світло окремо, ні барвник не впливали на інфузорії, тоді як сумісна дія цих двох факторів призводила до їх загибелі.

Явище фотосенсибілізації — це процеси, за яких світлова енергія, поглинута молекулами, що мають хромофори (сенсibilізатори), передається іншим молекулам, неспроможним самостійно поглинати світло.

Це явище поширене в природі. Відомо, що деякі дикоростущі рослини містять сильнодіючі хімічні сполуки; тварини, які поїдають ці рослини, стають чутливими до світла в непігментованих ділянках шкіри, особливо навколо очей, рота, вух та копит, де волоссяний покрив рідкий.

Основні симптоми — свербіж, виникнення пухирців розміром з горошину (що лопаються), кон'юнктивіт, стоматит, гарячковий стан, запальний процес (навіть у мозку), збудження або пригнічення. Тварина починає тертися, вносить інфекцію і може загинути через 8–10 годин.

#### Основні механізми фотосенсибілізації

Можна виділити процеси, що характеризують взаємодію світла, сенсibilізатора та біологічного субстрату:

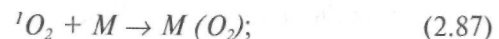
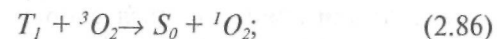
1. Поглинання світла молекулою сенсibilізатора та перехід її у збуджений стан:



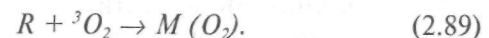
2. Інтерконверсія у триплетний стан:



3. Перенесення енергії триплетного стану сенсibilізатора до триплетного стану кисню:



4. Перенесення енергії триплетного стану сенсibilізатора до молекули субстрату з утворенням радикалів:



Реактивні властивості синглетного кисню і хімічних радикалів спричиняють певні зміни молекул субстрату.

#### Основні типи фотосенсибілізації

Всі захворювання, спричинені фотосенсибілізацією, можна поділити на три класи:

**Первинна фоточутливість.** У ролі хімічних сполук, що підвищують чутливість тварин до світла (фотосенсибілізаторів), виступають *гіперіцин* та *фагопірин*. Гіперіцин — червоний пігмент, що міститься у листках, стеблах та квітках представників родини *Guttiferae*, зокрема: *Hypericum perforatum* (звіробій), *H. crispum*, *H. pulchrum*, *H. leucoptycodes*, *H. maculatum*. Загальна назва захворювань — *гіперіцизм*. Тварини, які поїдають рослини, що містять гіперіцин, стають чутливими до світла. Звичайно під вплив гіперіцину потрапляють вівці, коні, велика рогата худоба. Хоча кози й свині також можуть потрапити під фотосенсибілізуючу його дію. В

овець, які поїдають *Hypericum perforatum*, симптоми не проявляються, коли вони перебувають у темному приміщенні. Але на світлі тварини проявляють фоточутливість, що триває кілька тижнів.

Цікавим є такий факт: багато комах не наближаються до рослин, що містять гіперицини. Винятком є бджола *Chrysolina gemellata*, що живиться нектаром *Hypericum perforatum*. Але остання не відвідує інших рослин, контролюючи таким чином утворення гіперицину на певних ареалах.

**Фагопіризм** спричиняється спорідненим з гіперицином рослинним пігментом *фагопірином*, присутнім у представників *Fagopyrum* (*F. esculentum* або *Polygonum fagopyrum*) — гречки посівної. Фагопірин також має фотосенсибілізуючий вплив на свиней, худобу, курчат. Можливі захворювання овець, свиней, коней (які поїдають на сонці гречку, просо, шведську конюшину) на шкірну екзантему, відсутню на пігментованих ділянках тіла; в овець, коней і великої рогатої худоби з білими мітками виникають дерматити, стоматити, а також опіки на місцях без пігментації.

#### **Фоточутливість, пов'язана з порушенням синтезу пігментів**

**Природжена порфірія.** Викликається ендегенними порфіринами — *уропорфірином* та *копропорфірином*. Перший виділяється у сечу, а другий відкладається в кістках та зубах (звідки походить ще одна назва захворювання — *рожеві зуби*). Є гіпотеза, згідно з якою ці порфірини виникають внаслідок порушення синтезу протопорфірину, що є часткою молекули гемоглобіну. Але в цілому походження порфірії не відоме.

#### **Гепатогенна фоточутливість**

Слід звернути увагу на фотосенсибілізуючі властивості *філоеритрину* — порфірину, одержаного з хлорофілу за допомогою бактерій, що є в кишечнику різних тварин, за видалення фітольної групи, що перешкоджає проходженню хлорофілу через клітинні мембрани.

У нормальному стані організм травоядних позбувається філоеритрину за допомогою жовчі; коли ж тварина поїдає деякі трави, що блокують жовчний протік, філоеритрин потрапляє у кров і шкірний покрив. У цьому разі він починає діяти як сенсibilізатор при опромінюванні тварини видимим або ультрафіолетовим світлом. Шкірний покрив набуває жовтого забарвлення, набрякає. Філоеритрин може бути виділений з крові хворих тварин і кристалізований. При ін'єкції його тваринам, які поїдали зелений корм, він викликає симптоми жовтяничної хвороби. При поїданні деяких зелених кормів тварина стає чутливою до світлового впливу.

Серед рослин, що призводять до захворювання тварин, можна виділити представників роду *Tribolus* (звідси назва хвороби — *триболізм*), зокрема *T. terrestris* та *T. ubi* (родина *Zygophyllaceae*); деякі види *Lippia*: *L. rhennani*, *L. pretoriensis* (родина *Verbenaceae*); трави *Panicum*; *P. laevifolium* та *P. coloratum* (родина *Graeminae*). В нашій країні фотосенсибілізацію зумовлюють конюшина (*Trifolium L.*), сухоребрик високий (*Sysimbrium altissimum L.*).

Запобігання хворобам — зміна пасовищ, утримання худоби в затемнених місцях.

#### **Фотодеградація продуктів**

Фотодеградація продуктів зумовлюється спільною дією хімічних сполук і оптичного випромінювання (ультрафіолетового або видимого діапазонів). Прикладом таких хімічних сполук можуть бути іони металів, кисень; джерелами оптичних випромінювань — Сонце, а також електричні світильники, використовувані у виробничих приміщеннях та на критих базах. Вплив світла на якість продуктів проявляється у зміні органолептичних показників (смаку, запаху, зовнішнього вигляду тощо) продуктів у процесі їх обробки або зберігання.

Сонце як природне джерело світла характеризується широким спектром випромінювання (400—800 нм),

що досягає поверхні Землі з максимумом близько 500 нм. Штучні джерела, використовувані на виробництві, включають люмінесцентні лампи так званого денного світла й ртутні лампи низького тиску. Люмінесцентні лампи мають, як правило, спектр випромінювання з двома основними максимумами — при 480 та 580 нм (фосфор), а також при 313, 365, 405, 436, 546, 578 нм (ртуть). У зв'язку з високою світловою віддачею та здатністю освітлювати великі площі, ці джерела використовують у складських і виробничих приміщеннях.

Ртутні лампи характеризуються спектром випромінювання з максимумом при 254 нм. Вони мають високу яскравість і використовуються у холодильних камерах, технологічних приміщеннях (пекарнях, молочарнях, пивоварнях) тощо.

Серед основних фотосенсибілізаторів у продуктах, що спричиняють їх руйнування при освітленні, можна виділити вітаміни, амінокислоти, залишки ненасичених кислот, жири, фосфоліпіди, харчові пігменти.

У цілому сільськогосподарські продукти є складними системами, до яких входять компоненти, що відрізняються за спектральними властивостями та фотосенсибілізуючою дією. Так, у процесі технологічної обробки молоко та молочні продукти зазнають спільної дії сенсибілізаторів і світла. Сенсибілізаторами є амінокислоти та білки молока, рибофлавін, метіонін, залишки ненасичених жирних кислот, вітамін А, аскорбінова кислота. Внаслідок фотосенсибілізації молоко може мати неприємний запах, який оцінюють як пригорілий, капустяний, металевий, маслянистий, картонний. Свіже м'ясо і м'ясні продукти, що зазнали впливу випромінювання джерел видимого або ультрафіолетового діапазонів, стають згіркими або змінюють забарвлення. Свіжість м'яса та його яскраво-червоний колір пов'язують звичайно з міоглобіном. Під впливом ультрафіолетового випромінювання (використовуваного для знищення мікроорганізмів) міоглобін бере участь у процесах окислення або денатурації, що супроводжується втратою кольору м'яса; крім того, зростає згіркість жирової частини м'яса.

Для зведення до мінімуму фотодеградаційних явищ слід використовувати освітлення з довжиною хвилі понад 500 нм (саме в цій області спектра відмічено знижену фотохімічну активність оптичного випромінювання), або рекомендувати упаковку і тару для продуктів, виготовлені з матеріалів, що поглинають випромінювання тієї частини спектра, яке спричинює фотодеградацію.

## ФОТОРЕЦЕПЦІЯ

Зорові аналізатори живих істот

### Зоровий аналізатор ссавців

Сенсорна інформація щодо навколишнього середовища сприймається людиною або твариною у вигляді змін таких параметрів як інтенсивність світла, довжина світлової хвилі, форма, розміри й положення об'єкта. Основний елемент *зорового аналізатора* (сенсорної системи, що перетворює оптичні стимули в послідовність нервових імпульсів) є *око*; його призначення — фокусування зображення на сітківку; регуляція кількості світла, що бере участь у формуванні зображення; перетворення зображення фоторецепторною системою ока і передача інформації в мозок.

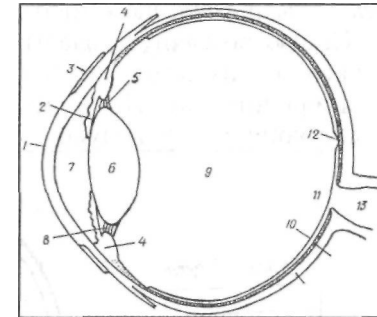


Рис. 2.65. Будова ока ссавців:  
1 — рогівка; 2 — райдужна оболонка; 3 — кон'юнктива; 4 — війчастий м'яз; 5 — зв'язки; 6 — кришталік; 7 — передня камера; 8 — зв'язки; 9 — скliste тіло; 10 — сітківка; 11 — оптичний диск; 12 — центральна ямка; 13 — зоровий нерв

Будову ока ссавців в горизонтальній площині наведено на рис. 2.65. Зовнішній захисний шар, що оточує очне яблуко, називається *склерою*. На передній частині ока склера переходить в прозору шарувату структуру,



що зветься *рогівкою*. Задні дві третини ока облицьовує пігментований шар — *судинна оболонка*. Саме в цій оболонці міститься *сітківка*, що має фоторецептори. Світло надходить в око крізь рогівку в *передню камеру*; так само, як і *задня камера*, вона заповнена прозорою рідиною — *водянистою вологою*. Між передньою і задньою камерами розташована *радужна оболонка*, яка виконує функції діафрагми. Завдяки скороченню або розслабленню мускулатури м'язів змінюється величина діаметра *зіниці* — отвору, через який світло проходить в задню частину ока. За радужною оболонкою розміщений *кришталік*, радіус кривизни якого може бути змінений за допомогою *війчастого тіла*. Простір між кришталіком та сітківкою заповнений *скловидним тілом* — желатиноподібною рідиною. На сітківці, до якої врешті-решт досягає світло, є *оптичний диск*, до якого сходяться нервові волокна. Там же розташована й *центральна ямка*, що є місцем найкращого зору.

Цікаво розглянути властивості зорового аналізатора деяких живих істот, які в процесі еволюції придбали специфічних рис. До таких істот можна сміливо віднести

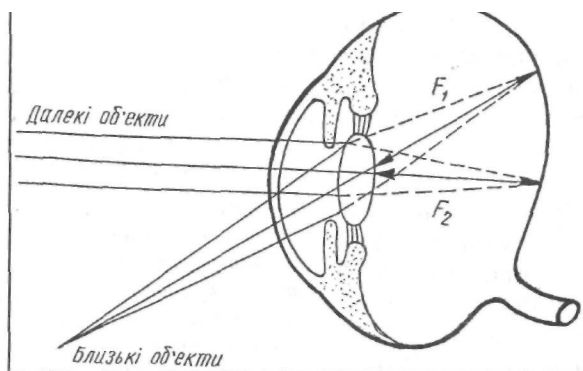


Рис. 2.66. Асиметрична форма очного яблука коня

розміщена поблизу верхньої ділянки ока; сітківка зсунута відносно оптичної осі ока. Війчасті м'язи відіграють незначну роль у зміні радіуса кривизни кришталіка. Здатність коня фокусувати зоровий аналізатор

на об'єкти, розташовані на різних відстанях, досягається простим нахилом голови. З кожною зміною положення голови коня змінюється фокусна відстань (рис. 2.66) — від 40 до 45 мм. Ще однією особливістю зорового аналізатора коня є форма зіниці — у молодих коней зіниця кругла, після 5—6 років форма зіниці наближається до еліпсоїдальної.

Розміри ока у ссавців варіюють у широких межах. Не завжди зміна розміра ока супроводжується адекватною зміною структурних елементів — товщина сітківки змінюється не так істотно, як розміри інших елементів.

#### Зоровий аналізатор птаці

Зоровий аналізатор птахів призначений не тільки для створення зорових зображень; функції його полягають також у формуванні кольорових образів, що важливо з точки зору розпізнавання сексуальних партнерів, суперників та ворогів. Більшість птахів проводить весь свій час у пошуках корму. Вони можуть вести денний або нічний спосіб життя; деякі з них літають високо над поверхнею землі. Все це накладає відбиток на будову й функції зорового аналізатора, що сформувався протягом еволюції.

Можна розрізнити чотири основних типи будови ока у птахів.

*Рурчастий (циліндричний)* тип ока характеризується грушеподібною формою, значною сітківкою й істотно меншою напівсферичною рогівкою, що виступає вперед (рис. 2.67,я). Чотири п'ятих ока сховано в черепній коробці птаха. Є чітко виражена *склеротична кісточка*. Такий тип ока у сови.

*Плаский* тип ока властивий курям (рис. 2.67,б).

*Кулястий* тип ока характерний для птахів-хижаків. Око цього типу має дзвоноподібну форму з опуклою рогівкою (рис. 2.67,в). Діаметр ока у хижаків значно менший, ніж у звичайних птахів. Такий тип ока забезпечує гостре фокусування на великих відстанях.

Пласко-сферичний тип ока у співочих птахів. Характерними рисами такого ока є ледь приплюснута, але сферична форма рогівки (рис. 2.67,г).

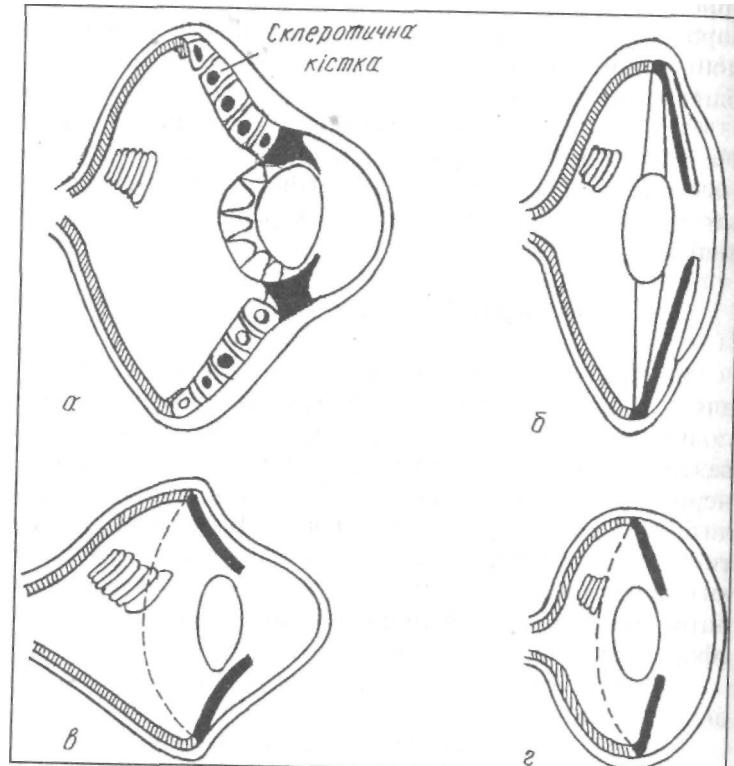


Рис. 2.67. Основні типи будови ока у птахів (пояснення в тексті)

Таким чином, птахи відрізняються не лише за формою ока, але й за його внутрішньою структурою. Очні яблука більшості птахів мають два специфічних пристрої для підвищення гостроти зору — *центрально* ямку і *гребінець*.

Центральна ямка являє собою надчутливу область, насичену колбочками, розташовану на сітківці. Зазвичай центральна ямка має форму вузької смужки. Це особливо доцільно для птахів, які полюють за комахами — видовжена форма цього органа дає можливість

контролювати комах без додаткових обертань голови. Око хижака обладнане двома центральними ямками, кожна з яких настроєна на різні об'єкти. Те ж саме можна сказати щодо швидких полювальників за комахами — ластівок і стриживів. Голуби взагалі не мають центральної ямки.

*Гребінець* являє собою складчасте пігментоване утворення, насичене кровоносними судинами і з'єднане з оптичним нервом (рис. 2.68). Кількість складок у гребінці залежить від способу життя — у свійської птиці вона становить: 15 у курки, 13 — у качки і гуски. Птахи, що літають на великих висотах, мають іншу кількість складок: 24 у галки, 23—26 — у ворони.

Існують гіпотези, згідно з якими гребінець виконує функції стабілізатора тиску всередині ока, зміни якого супроводжують швидкий рух птахів; є органом чуття, здатним відчувати зміни тиску при акомодції та забезпечувати гостроту бачення віддалених об'єктів; послаблює засліплюючу та пошкоджуючу дію сфокусованого кришталіком сонячного випромінювання на сітківку; бере участь у навігаційних здатностях птахів орієнтуватися відносно Сонця; відчуває вплив зовнішнього магнітного поля і сонячного випромінювання через участь кровоносної системи гребінця як сукупності струмопровідних витків, розміщених у двох взаємно перпендикулярних площинах, і використовує фотоманітний ефект для орієнтації у просторі.

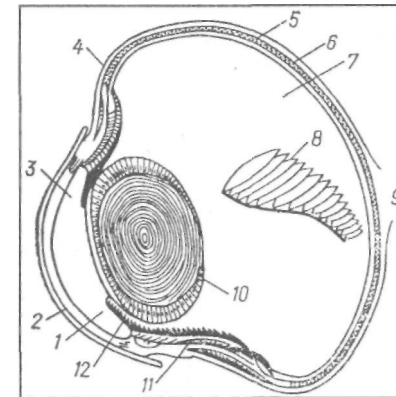


Рис. 2.68. Будова зорового аналізатора птаха: 1 — кон'юнктива; 2 — рогова оболонка; 3 — передня камера; 4 — склера; 5 — судинна оболонка; 6 — сітківка; 7 — склисте тіло очного яблука; 8 — гребінець; 9 — зоровий нерв; 10 — кришталік; 11 — м'яз війковий; 12 — райдужна оболонка

Структуру ока риби наведено на рис. 2.69. Для захисту рогівки від великих тисків і піску око обладнане оболонкою — твердим прозорим утворенням. Коефіцієнти заломлення оболонки, рогівки і води приблизно однакові. Фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою *втягуючого м'яза*, що пересуває кришталик вздовж оптичної осі рогівки. Форма ока залежить від способу життя риби — мешканці глибин мають рурчасту форму, причому сітківка розміщена так, щоб забезпечити фокусування на об'єкти на різних віддальх.

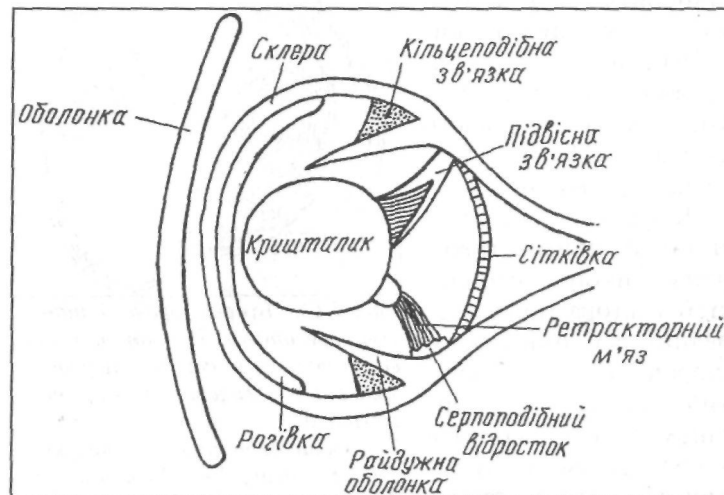


Рис. 2.69. Будова ока риби

Форма ока інших типів риб нагадує правильний трикутник; вона забезпечує різні фокусні відстані для об'єктів, розташованих вгорі або безпосередньо перед рибою.

В акул, наприклад, очі взагалі без оболонки. Крім того, фокусування ока на об'єкт здійснюється за допомогою м'яза, що наближує кришталіка до рогівки (на відміну від інших риб).

Реакція на світло у комах здійснюється за допомогою двох складних очей і трьох простих. Просте око являє собою лінзоподібний горбик на хітиновому покриві голови, до якого зсередини підходять нервові клітини. Складається просте око з прозорої лінзи, шару зорових клітин (близько 800) і зорового нерва (рис. 2.70). На сітківці простого ока не формується зорове зображення; в той же час прості очі в змозі сприймати такі параметри оптичного випромінювання як інтенсивність, період і спектральний склад. Вважається, що прості очі здатні реагувати на сутінки або світанок, забезпечуючи орієнтацію комах в умовах недостатньої освітленості.

Складні очі мають фасеткову структуру, що формує мозаїчну картину (рис. 2.71). Складається складне око з набору *оматидіїв*, кількість яких становить 25000 у жуків, 8000–10000 у бджіл, 4000 у мух, 100–1000 у мурашок. Основними елементами омаїдию є кришталева лінза (рогівка), кришталевий конус, пігментні клітини, фоторецептор, рабдом (ретинальна клітина) (рис. 2.72). У бджоли, наприклад, до внутрішнього кінця кришталевого конуса приєднано вісім радіально розташованих зорових клітин, завдяки яким комаха

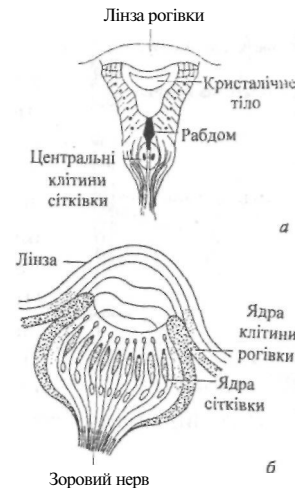


Рис. 2.70. Просте око комах: а — латеральне, б — дорсальне

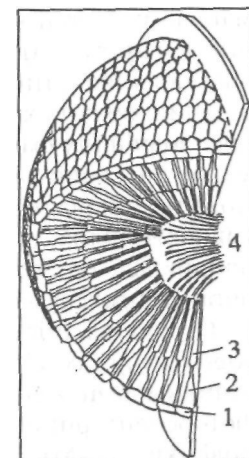


Рис. 2.71. Складне око бджоли: 1 — рогівка; 2 — кришталевий конус; 3 — папілки сітківки; 4 — зоровий нерв



Рис. 2.72. Омати-  
дії бджоли

здатна сприймати поляризацию відбитого сонячного випромінювання і орієнтуватись у просторі.

Щодо здатності комах сприймати колір вважається що метелики, мухи і деякі жуки реагують на синій колір, бджоли — на червоний, жовтий, зелений і синьо-зелений. Крім того, комахам властива чутливість до ультрафіолетового випромінювання. Але можливим поясненням відвідування комахами кольорових квітів є їх здатність розрізняти інтенсивність випромінювання, відбитого від різних частин квітки.

#### Фоторецепція у мікроорганізмів

Основне призначення фоторецепторної системи мікроорганізмів — забезпечення організму інформацією про стан навколишнього середовища, зокрема, інтенсивність світлового стимулу, просторових і часових характеристик, за допомогою яких мікроорганізм здатний орієнтуватися відносно одного з найважливіших зовнішніх факторів — світла. Просторові та часові зміни інтенсивності та напрямки світлового потоку можуть зумовлювати відповідні зміни в рухливій активності цілих організмів (*фототаксиси*), їх частин, наприклад, органів вищих рослин (*фототропізми*) або органел (*фотоорієнтація хлоропластів*).

Структура, місце розташування і принципи дії фоторецепторних систем мікроорганізмів відзначаються великим різноманіттям. Розглянемо як приклад деякі фоторецепторні системи водних мікроорганізмів, в основі яких лежать різні фізичні принципи.

Фоторецепторна система динофіцієвих водоростей має особливу спеціалізовану органелу — *оцелоїд*, що являє собою фокусуючу систему (рис. 2.73). Цілком можливо, що оцелоїди динофлагелят здатні не тільки

реагувати на напрямок світлового потоку, але й утворювати зорові зображення.

Представник еугленофітових водоростей *Euglena gracilis* має фоторецептор — параджгутикове тіло, розміщене біля основи джгутика. Збоку, в цитоплазмі, на стінці резервуара міститься стигма, яка виконує функції модулятора світлового потоку, що попадає на фо-

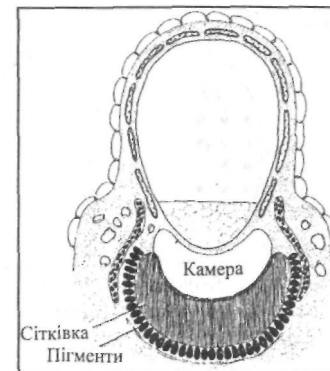


Рис. 2.73. Оцелоїд динофі-  
торецептор (рис. 2.74). Під ЦІ<\*ої водорості

час руху вперед, до джерела світла клітина еуглени обертається навколо поздовжньої осі. Як тільки клітина відхиляється від напрямку світлового потоку, стигма при кожному обертанні періодично затемнює фоторецептор. Сигнал передається на джгутик і останній коригує рух клітини. Якщо рух клітини збігається з напрямком світлового потоку, затінення фоторецептора стигмою не відбувається і потреба в корекції руху відпадає.

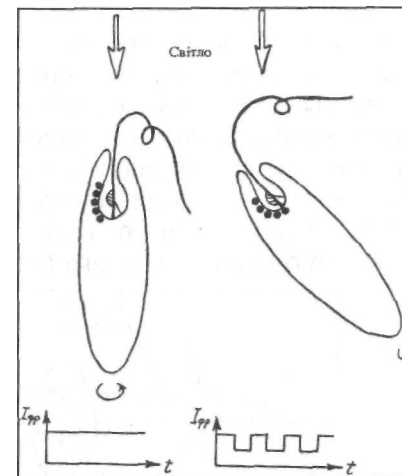


Рис. 2.74. Фоторецепторна систе-  
ма водорості *Euglena gracilis* Теод

Своєрідну фоторецепторну систему має зелена водорість *Chlamydomonas reinhardtii*,

стигма якої складається з чотирьох шарів пігментованих глобул, що виконують функції чверть-хвильової пластини. Якщо світло падає на бокову поверхню клітини, де розміщена стигма, фоторецептор отримує сигнал посиленої інтенсивності, що дорівнює сумі інтенсивностей падаючого і відбитого світла завдяки

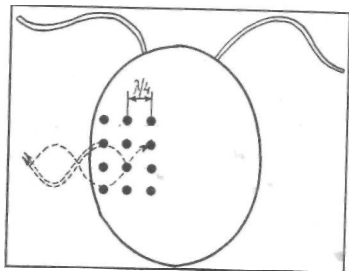


Рис. 2.75. Фоторецепторна система водорості *Chlamydomonas reinhardtii*

Таким чином стигма утворює своєрідну антену, що визначає місце розміщення джерела світла.

### Механізми фоторецепції

#### Заломлююча здатність ока

Світловий потік, що потрапляє в око, зазнає заломлення на роговій оболонці ( $n = 1,376$ ;  $r = 7,8$  мм). Після цього відбувається заломлення під час переходу з рогової оболонки в передню камеру ( $n = 1,336$ ). Подальше заломлення відбувається в кришталіку, показник заломлення якого поступово зростає від 1,386 до 1,406 в напрямку його ядра. За кришталіком розміщена внутрішня камера ока ( $n = 1,336$ ): Таким чином,

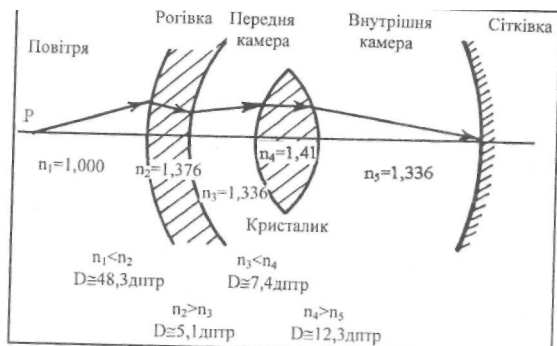


Рис. 2.76. Заломлююча здатність ока

структура ока включає чотири сферичних межі розподілу середовищ з різними показниками заломлення

інтерференції світлових потоків, які потрапляють на стигму і відбиваються від кожного з шарів (рис. 2.75). Якщо освітлюється протилежний бік, сигнал, що отримує фоторецептор, послаблюється завдяки поглинанню світла тілом клітини і стигмою.

(рис. 2.76). Розрахунки свідчать, що оптична сила ока становить: 58,64 діоптрій у людини; 61,3 — у овці; 47,7 — у корови; 78,2 — у коня.

### Механізми зору

Сітківка ссавців складається з п'яти типів клітин — фоторецепторних, біполярних, горизонтальних, амакринових і гангліозних. Фоторецепторні клітини (палички і колбочки) перебувають у контакті з біполярними клітинами, що здійснюють зв'язок з гангліозними клітинами (рис. 2.77). Останні передають потенціал дії мозку. Горизонтальні клітини з'єднують по горизонталі фоторецепторні і гангліозні клітини; амакринові — по горизонталі біполярні й гангліозні клітини.

Фоторецепторні клітини (палички і колбочки) містять зорові пігменти — *родопсин* у паличках і *йодопсин* — у колбочках. Родопсин являє собою білок, що складається з білка *опсину* та хромоформної групи — *ретиналю*. Йодопсин також містить ретиналь, але відрізняється від родопсину білковою частиною. Під дією світла молекула ретиналю збуджується, зазнаючи при цьому процесу фотоізомеризації. Потім відбувається серія конформаційних перебудов молекули білка опсину, пов'язаних із переміщенням по ній заряду, що

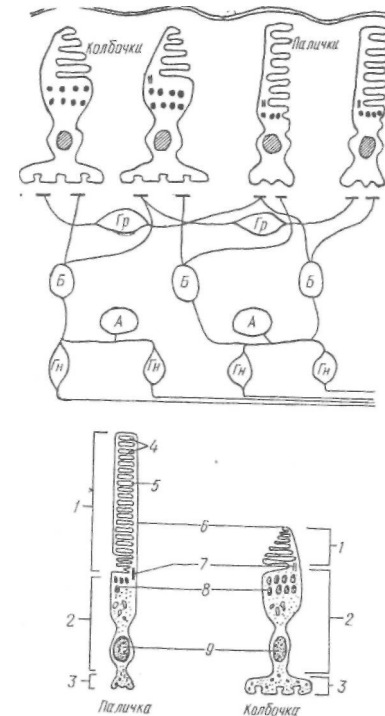


Рис. 2.77. Основні типи клітин сітківки

структура ока включає чотири сферичних межі розподілу середовищ з різними показниками заломлення

утворює ранній рецепторний потенціал, а через 1 мс — пізній рецепторний потенціал. Під впливом світла відбувається замикання йонних каналів, що призводить до гіперполяризації клітинної мембрани. Очевидно, аналогічні процеси відбуваються й у колбочках: поглинання кванта світла молекулою йодопсину зумовлює її збудження та появу раннього рецепторного потенціалу. Таким чином, процеси зору являють собою складний ланцюг ініціації світлом у зорових пігментах фотохімічних реакцій, ізомеризації молекул фотопігментів, зміни проникності мембрани фоторецептора, утворення електричного потенціалу в фоторецепторній мембрані і передачі електричного імпульсу від зорового нерва мозку.

## ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

*Іонізуюче випромінювання* — це потоки частинок і електромагнітних квантів, взаємодія яких з середовищем зумовлює іонізацію його атомів і молекул. До іонізуючого випромінювання можна віднести рентгєнівське і у-випромінювання, потоки ог-частинок, електронів, позитронів, протонів, нейтронів. У 1896 г. французький фізик А. Беккерель відкрив явище *радіоактивності* — здатності деяких атомних ядер самовільно перетворюватися в інші ядра з випромінюванням частинок або електромагнітних квантів. Пізніше було встановлено наявність трьох типів радіоактивних випромінювань —  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  — променів, причому  *$\alpha$ -частинки* являють собою ядра гелію ( ${}^4\text{He}$ ), що містять два протони і два нейтрони;  *$\beta$ -частинки* — це електрони і позитрони з великою енергією, що посиляються атомними ядрами під час бета-розпаду; *у-випромінювання* — це короткохвильове ( $< 10^{-10}$  м) випромінювання.

Основними джерелами іонізуючих випромінювань і радіоактивного забруднення біосфери є природна радіоактивність, розробка, добування і збагачення копалин, використання радіоактивної сировини в реакторах, пе-

реробка ядерного палива в установках, випробування й експлуатація ядерної зброї, захоронення відпрацьованого палива і радіоактивних відходів.

### Закон радіоактивного розпаду

Самовільний розпад атомних ядер підпорядковується *закону радіоактивного розпаду*: для великої кількості ядер число актів розпаду в одиницю часу (швидкість розпаду) пропорційно вихідній кількості ядер  $N_0$ :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (2.90)$$

Це рівняння є диференційною формою закону радіоактивного розпаду; інтегральна форма цього закону має вигляд:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.91)$$

де  $N_0$  — кількість радіоактивних ядер у момент часу  $t = 0$ ;  $N$  — кількість ядер у момент часу  $t$ ;  $\lambda$  — стала розпаду ( $\text{с}^{-1}$ ).

Швидкість радіоактивного розпаду називають *абсолютною активністю*  $a$ :

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (2.92)$$

Одиницею радіоактивності є *беккерель (Бк)*, що відповідає одному розпаду за секунду ( $1 \text{ Бк} = \text{с}^{-1}$ ); на практиці використовують *кюрі* — абсолютна активність такого препарату, в якому відбувається  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів за секунду ( $1 \text{ Кюрі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Проміжок часу, за який відбувається розпад половини радіоактивних ядер елемента, називається *періодом напіврозпаду*  $T_{1/2}$ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (2.93)$$

звідки

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (2.94)$$

Наприклад, період полураспаду  $T_{1/2}$  становить для: радіоактивного ізотопу вуглецю  $^{14}_6C$  — 5730 років; радію  $^{226}_{88}Ra$  —  $1,6 \cdot 10^3$  років; йоду  $^{131}_{53}I$  — 8,04 днів.

#### Характеристики іонізуючих випромінювань

Вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань під час їх взаємодії з середовищем, від яких залежать радіаційні ефекти в об'єктах живої та неживої природи, що опромінюються, становить суть *дозиметрії*.

*Доза* — це порція випромінювання, яка поглинається речовиною, що опромінюється. Доза залежить від типу випромінювання, його інтенсивності, складу речовини, що опромінюється, і тривалості опромінювання. Розрізняють такі дози:

*Поглинута доза* — це розрахована на одиницю маси речовини, що опромінюється, поглинута енергія випромінювання:

$$D = \frac{dE}{dm}, \quad (2.95)$$

де  $dE$  — середня поглинута енергія,  $dm$  — маса речовини.

Одиниці поглинутої дози:  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ ;  $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$ .

(Термін «*рад*» походить від англійської фрази «*Radiation Absorbed Dose*»).

Швидкість накопичення поглинутої дози називається *потужністю поглинутої дози*:

$$P_n = \frac{dD_n}{dt}. \quad (2.96)$$

Одиниця потужності поглинутої дози —  $\text{Гр} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Відносна біологічна ефективність*. Під час опромінювання живих організмів, зокрема людини, можуть складатися умови, що визначають рівень радіаційної безпеки. Справа в тому, що біологічні ефекти залежать не тільки від дози, але й від типу іонізуючого випромінювання. Наприклад, при однаковій дозі  $\alpha$ -частинки призводять до біологічних руйнувань в десятки разів менших, ніж при дії рентгенівського випромінювання. Таким чином, знання поглинутої дози недостатньо для оцінки радіаційно-індукованого ефекту. Біологічні ефекти, що спричиняються будь-яким іонізаційним випромінюванням, прийнято порівнювати з біологічними ефектами, що виникають під впливом рентгенівського випромінювання з граничною енергією 250 кеВ. Це порівняння визначає поняття *відносної біологічної ефективності*  $k$ , яка визначається як кількість рад рентгенівського або  $\gamma$ -випромінювання і спричиняє такі самі біологічні пошкодження, як і 1 рад даного іонізуючого випромінювання. Для рентгенівського випромінювання  $k = 1,0$ ; для  $\alpha$ -частинок — 10+20; для  $\beta$ -частинок — 1,0+1,7; для повільних нейтронів — 4+5; для швидких нейтронів і протонів — 10.

Добуток поглинутої дози в радах на величину  $k$ , а саме  $D(\text{peM}) = D(\text{рад}) \cdot k$  отримав назву *рем* (від англійської фрази «*Radiation Equivalent in Man*»).

У табл. 2.13 наведено можливий вплив на людину залежно від дози іонізуючого випромінювання.

*Експозиційна доза* — дорівнює абсолютній кількості іонів одного знака, що утворюються в повітрі під час повного гальмування електронів і позитронів, визволених фотонами в одиниці маси повітря:

$$X = \frac{dQ}{dm}, \quad (2.97)$$

де  $dQ$  — сумарний заряд всіх іонів одного знаку,  $dm$  — маса повітря.

### 2.13. Можливі впливи іонізуючого випромінювання залежно від дози

Доза, рем	Вплив на стан людини
0-50	Відсутні стійкі симптоми
50-200	Зменшення кількості білих кров'яних клітин, нудота, 10% смертних випадків протягом місяців унаслідок отримання дози 200 рем
200-400	Втрата кров'яних клітин, лихоманка, кровотеча, втрата волосся, нудота, діарея, втома, поява плям на шкірі, 20% смертних випадків протягом місяців
400-500	Ті ж симптоми, що й при дозах 400-500 рем, але важчі; збільшення рівня інфекції за нестачі білих кров'яних клітин; 50% смертних випадків протягом місяців при дозі 450 рем
500-1000	Серйозні шлунково-кишкові порушення, серцево-судинний колапс, порушення в нервовій системі, доза 700 рем викликає летальний кінець протягом кількох тижнів
10000	Смерть протягом годин
100000	Смерть протягом хвилин

Одиниці експозиційної дози:  $1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  
позасистемна одиниця:  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$  або  $1 \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}$ .

Швидкість приросту експозиційної дози в межах випромінювання називається *потужністю експозиційної дози*:

$$P_e = \frac{dD_e}{dt}. \quad (2.98)$$

Одиниця потужності експозиційної дози —  $\text{Кл} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Еквівалентна доза* -- це поглинута енергія випромінювання, біологічно еквівалентна одному рентгену. Під час опромінення живих організмів виникають біологічні ефекти, величина яких при однаковій поглинутій дозі різна для різних видів випромінювань. Еквівалентна доза використовується для порівняння біологічного ефекту даного типу випромінювання з рентгенівським.

Одиниці еквівалентної дози — *зіверт*:  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ ;  
 $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$ .

### Вимірювання іонізуючих випромінювань

*Іонізаційна камера* вимірює індуковану випромінюванням іонізацію. Складається вона з циліндричної металевої трубки, заповненої газом при низькому тиску, і металевого електрода, розміщеного вздовж осі. Електрод приєднано до високого, близько  $10^3 \text{ В}$ , позитивного відносно трубки потенціалу (рис. 2.78).

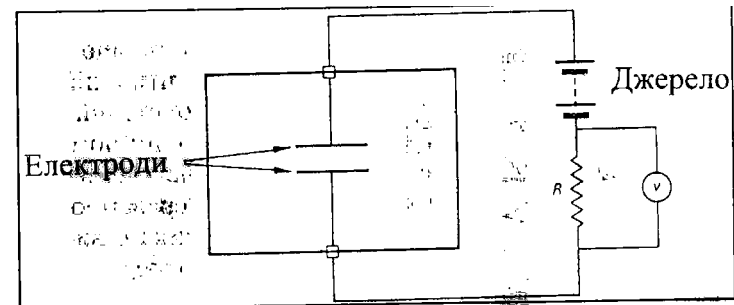


Рис. 2.78. Іонізаційна камера

Коли високоенергетична частинка або квант проходить через вікно в трубку, вона зумовлює іонізацію атомів газу. Електрони, вилучені з цих атомів, притягуються до позитивного електрода, причому, під час цього руху вони також іонізують атоми газу. В результаті утворюється імпульс струму на виході з трубки. Така система називається *лічильником Гейгера-Мюллера*.

*Напівпровідниковий лічильник*. В основі принципу його роботи лежить іонізація атомів твердого тіла,



внаслідок якої і дірок у валентній зоні утворюються вільні електрони в зоні провідності. Ширина забороненої зони становить 2–3 еВ (де 1 еВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж); отже, й енергія, необхідна для утворення пари електрон-дірка, є величиною такого самого порядку. Нагадаємо, що в газових іонізаційних камерах для утворення пари іонів потрібна енергія 34 еВ (для повітря). Таким чином, напівпровідникові лічильники мають на порядок більшу чутливість ніж газові.

**Сцинтиляційний лічильник.** Принцип дії полягає в збудженні атомів твердого тіла чи речовини під впливом випромінювання. Перехід атомів із збудженого стану в основний супроводжується випромінюванням кванта видимого або ультрафіолетового діапазону. Кожний такий світловий спалах, що називається *сцинтиляцією*, реєструється фотоелектронним помножувачем, електричні імпульси з виходу якого подаються на систему реєстрації. Типовими матеріалами для сцинтиляційних лічильників є кристали  $ZnS(Ag)$ ,  $NaI(Tl)$ ,

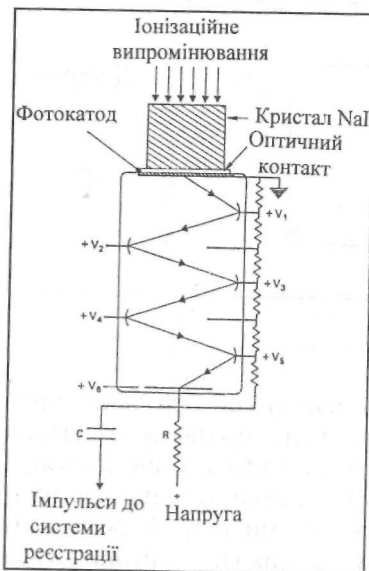


Рис. 2.79. Сцинтиляційний лічильник

лини (бульбашкова камера), утворенню розрядів у

газах (іскрова камера), фотохімічній дії (товстошарові фотоплівки).

### Радіоактивні забруднення

Всі типи радіоактивного випромінювання характеризуються різною глибиною проникнення в живий організм. Так,  $\alpha$ -частинки затримуються дуже тонким приповерхневим шаром шкіри;  $\beta$ -частинки здатні проникати на кілька сантиметрів углиб тканини;  $\gamma$ -частинки в деяких випадках можуть досягнути організму крізь бетонні або свинцеві мури.

Найнебезпечнішим є  $\gamma$ -випромінювання, оскільки нейтрони мають великі розміри і значну кінетичну енергію. Вони здатні викликати розрив молекули ДНК. У той же час, з екологічної точки зору нейтрони не становлять серйозної небезпеки — їх можна виявити лише поблизу ядерних реакторів або під час атомного вибуху. Всі типи радіоактивного випромінювання є іонізуючими. Іони, що утворюються при цьому, дуже реактивні. Великі дози іонізуючого випромінювання можуть спричинити порушення в клітинах; слабкі дози здатні індукувати мутації в організмі.

З точки зору екології найбільш небезпечними є радіоактивні елементи з періодом напіврозпаду від кількох тижнів до кількох років. Наприклад, стронцій  $^{90}Sr$ , що накопичується в кісткових тканинах (28 років) і цезій  $^{137}Cs$  (32 роки). Крім того, небезпечними є ізотопи простих елементів, що входять до складу живої речовини —  $^{14}C$ ,  $^{32}P$ ,  $^{45}Ca$ ,  $^{35}S$ . Небезпечні й радіоактивні опади, що відбуваються внаслідок випробування ядерної зброї. Радіоактивні домішки розсіюються в атмосфері, а потім через ґрунт і воду потрапляють у біомасу. Джерелом радіоактивного забруднення може бути атомна промисловість. Забруднення може відбуватися також і під час видобування і збагачення копалин, використання сировини в реакторах, обробки ядерного палива в установках. Вкрай гострою для навколишнього середовища є проблема утилізації радіоактивних відходів.

### Вплив іонізуючих випромінювань на живі організми

Внаслідок того, що енергія квантів іонізуючих випромінювань значно перевищує енергію будь-яких хімічних зв'язків, відбувається руйнування молекул живої тканини, що призводить до загибелі клітин і порушення систем життєдіяльності організму. Процес іонізації атомів і молекул пов'язаний з їх збудженням, через що вони набувають підвищеної реакційної здатності завдяки появі неспарених електронів. Все це може сприяти утворенню нових хімічних сполук або зміні окремих ділянок молекул.

Вплив іонізуючого випромінювання на воду, що міститься в біологічних клітинах, пов'язаний з утворенням вільних радикалів, здатних завдавати серйозної шкоди біологічно важливим молекулам. Крім того, іонізуюче випромінювання діє на молекули ДНК (руйнування нуклеотидів, розриви полінуклеотидних ланцюгів), білків (зміни амінокислотних залишків, порушення системи водневих зв'язків, втрата конформаційних станів), ліпідів (процеси радіолізу). Всі ці руйнування біологічно важливих молекул і клітинних структур призводять до розвитку *променевого ураження*. Крім різноманітних безпосередніх порушень процесів життєдіяльності можливі віддалені ефекти опромінення, що проявляються в формі злоякісних пухлин, скорочення тривалості життя, послаблення імунітету, мутагенних наслідків.

### Радіоактивні відходи

У всіх ядерних реакторах використовують уранове паливо. Уран виділяють з руди і очищають за допомогою хімічних процесів. Природний уран складається з 0,72% урану-235 і 99,2% урану-238. Такий уран використовують в реакторах з важкою водою. Для роботи реакторів з легкою водою потрібний уран-235, концентрація якого збільшується в 4+5 разів на збагачувальних підприємствах. Уранове паливо виготовляють у вигляді стержнів, які занурюють у реактор, де вони залишаються протягом майже двох років. За цей час ці

стержні стають вкрай радіоактивними через процес розпаду і утворення трансуранових елементів — плутонію, америцію, кюрію. Після того, як стержні виймають з реактора, їх охолоджують протягом одного-двох

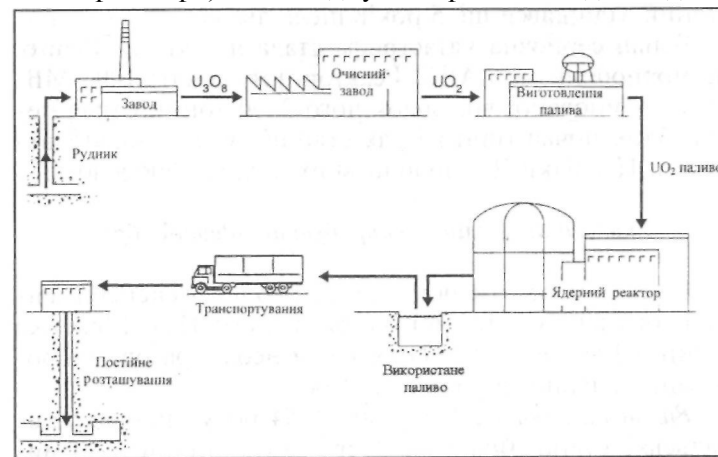


Рис. 2.80. Схема технологічного процесу обробки уранового палива

років у спеціальних басейнах і транспортують в підземне сховище. Діаграма повного циклу технологічних операцій з ядерним паливом наведено на рис. 2.80.

### Вплив радіоактивних відходів на живі організми

Процеси обробки та експлуатації ядерного палива можна поділити з точки зору можливих впливів на здоров'я людини на дві категорії. До першої слід віднести технологічні операції, що супроводжуються утворенням невисокого рівня відходів — це добування уранових копалин та їх очищення. Ці операції можуть завдавати шкоди людському організму за контакту з ними лише протягом тривалого часу.

Відходи високого рівня мають місце під час роботи з урановими стержнями, коли за нетривалий час можна отримати високі рівні радіоактивності. Як, наприклад, під час інциденту з системою охолодження на атомній електростанції Тримайл-Айленд у Харрісберзі,

14-10<sup>6</sup> Кі <sup>137</sup>Cs. Всі ці радіоактивні речовини мігрують у тропосфері і повертаються на земну поверхню у вигляді опадів. Через харчовий ланцюг «грунт^трави-»худо́ба-^моло́ко або м'ясо-»люди́на» здійснюється радіоактивне забруднення людського організму. Далі радіоактивні елементи селективно накопичуються в окремих органах — йод (<sup>131</sup>I) ~ в щитовидній залозі, стронцій (<sup>90</sup>Sr) — в кістках, цезій (<sup>137</sup>Cs) — в м'язах.

*Вплив на рослинність.* Відомо, що найбільша здатність накопичуватися у врожаї сільськогосподарських рослин у <sup>90</sup>Sr. Це зумовлене тим, що близько 80—90% стронцію, що надійшов у рослину, накопичується в надземних органах. Крім того, стронцій, перебуваючи в ґрунті в рухомішому стані, ніж інші продукти поділу, інтенсивніше може надходити в рослини. За певних умов вміст <sup>137</sup>Cs у рослинах може бути також високим. При надходженні через листя цезій інтенсивно мігрує в інші органи і в чималій кількості може накопичуватися в урожаї, зокрема, в репродуктивних органах рослини.

*Вплив на атмосферу.* Атмосферні ефекти застосування ядерної зброї пов'язані з глобальним переносом і осадженням радіоактивних продуктів; зменшення кількості озону в стратосфері і як наслідок цього підсилення інтенсивності сонячного ультрафіолетового випромінювання в нижніх шарах атмосфери і на земній поверхні; можливою зміною клімату внаслідок зменшення концентрації озону і інжектування в стратосферу пилу з земної поверхні.

*Вплив на гідросферу.* Навіть далеко від епіцентру вибухів води океану можуть бути сильно радіоактивними як на поверхні, так і на глибині. Ще більшою мірою радіоактивним може бути макро- і мікропланктон, що концентрує ізомери з води. Активно піддаються радіоактивному забрудненню й водорості. З планктону і водоростей починаються харчові ланцюги, що призводить до потрапляння радіоактивних речовин у водні організми. Такі швидкохідні риби як меч-риба і тунець можуть випереджати на кілька місяців швидкість північної екваторіальної течії, що несе радіоактивно заражені внаслідок ядерних вибухів води, і можуть в цілком чис-

тих водах ставати джерелом радіоактивності для своїх ворогів, а також, потрапляючи на ринок, і для людини.

Є відомості про те, що окрилені комахи, личинки яких жили й живилися в радіоактивно заражених середовищах, мають в своєму тілі велику кількість радіоактивних ізомерів і здатні переносити їх у польоті на великі відстані.

Перелітні птахи здатні також переносити частки радіоактивності водосховища, що забруднювалося, в інші країни, на інші материки, особливо ж — водоплаваючі, що мають при живленні безпосередній контакт з мулом і донними організмами.

*Вплив на літосферу.* Заражені ділянки ґрунту поступово будуть очищатися від забруднення завдяки участі бактерій і рослин, що концентрують ізомери і передають їх іншим тваринам, а також завдяки міграції та переміщенню радіоактивно заражених організмів, насіння та частинок ґрунту у просторі. Суто ерозійні процеси також роблять свою справу. Крім того, і частина рухомих ґрунтових тварин — черв'яків, личинок комах, кротів, ховрахів, мишоподібних гризунів, що так чи інакше контактують з радіоактивним забрудненням, неминуче надають прискорення процесу його розсіювання.

*Вплив на клімат.* Ядерні вибухи, без сумніву, здатні спричинити зміни клімату, пов'язані з частками пилу, зменшенням інтенсивності сонячного випромінювання і відповідним зниженням середньорічної температури. Крім того, можливе зменшення вмісту озону і збільшення інтенсивності ультрафіолетового випромінювання. Внаслідок змін у розподілі температур можна очікувати невеликого зміщення поясів вітрів, а на поверхні землі можуть відбутися деякі зміни в розподілі опадів. Така ситуація може бути катастрофічною для деяких природних і сільськогосподарських екосистем. Наслідком тривалого пониження температури буде зміщення різноманітних видів природних екосистем в напрямку низьких широт. Зниження температури на 1 °C призведе до скорочення вегетації рослинності приблизно на 10 днів, що може зумовити зменшення річної продуктивності. Ядерні вибухи великих масштабів можуть

впливати на клімат внаслідок зміни альбедо, пожеж, руйнування озонового шару і утворення хмар, при вибухах. Через зниження температури можливе також уповільнення швидкості розкладу мінералів.

### ГІДРОГРАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

*Гідрографічні фактори* (або *абіотичні фактори водного середовища*) — це фізичні і хімічні властивості води як середовища мешкання живих організмів.

Вода є найбагатшим компонентом біосфери, в той же час — і найважливішим, оскільки вона є основним середовищем для будь-яких метаболічних процесів. З точки зору екології вода використовується для вилучення й розчинення більшості природних і антропогенних відходів. Деякі фізичні властивості води мають безпосередній зв'язок з еволюцією навколишнього середовища і функціонуванням у ньому живих організмів.

#### Водні ресурси

*Грунтові води* виникають завдяки проникненню поверхневих вод крізь ґрунтові пори. Підземні утворення сприяють виникненню водних резервуарів. Вода здатна залишати ці резервуари. Розмір ґрунтових пор, величина в'язкості води та інші фактори впливають на швидкість переміщення ґрунтових вод, що варіює від 1 м/день до 1 м/рік.

З точки зору екології важливим фактором є те, що ґрунтові води не зазнають забруднення такою мірою, як поверхневі, завдяки фільтруючим властивостям частинок ґрунту. Але якщо забруднення сталося, процес очищення дуже важкий і довготривалий.

*Поверхневі води* річок та озер являють собою важливі джерела води для суспільства, але недовіком цих вод є їх відкритість для всіляких забруднень. Дощова вода в основному позбавлена контамінантів і використовується для споживання в тих країнах, які не мають водних басейнів (наприклад, Бермудські острови).

#### Фізичні характеристики води

##### Густина води

Густиною речовини  $\rho$  називають масу, що припадає на одиницю об'єму:

$$\rho = m/V. \quad (2.99)$$

Густина як екологічний фактор визначає умови пересування організмів (навіть на великих, близько 2000 м, глибинах, де тиск становить 400–500 атм). Крім того, густина води дає можливість опиратися на неї представникам планктону. Значення густини води наведено в табл. 2.15.

#### 2.15. Густина води

Густина, кгм <sup>3</sup>	Температура, °С
999,8	0
1000,0	4
999,7	10
998,2	20
995,6	30
992,2	40

#### В'язкість води

*В'язкість* — це властивість рідин і газів чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно другої. Характеризує цей опір *коефіцієнт в'язкості*.

#### 2.16. Коефіцієнт в'язкості води

Речовина	Коефіцієнт в'язкості, Па-с	Температура, °С
Вода	1,78110 <sup>-3</sup>	0
Вода	1,30610 <sup>-3</sup>	10
Вода	1,00210 <sup>-3</sup>	20
Вода	0,798·10 <sup>-3</sup>	30
Вода	0,653 10 <sup>-3</sup>	40

Значення густини і коефіцієнта в'язкості для води наведено в табл. 2.16.

#### Теплофізичні характеристики води

Вода є прозорим тілом для видимого діапазону, тому оптичне випромінювання проникає на значні глибини, що зумовлює нагрівання води в шарі завтовшки до **кількох** метрів. Теплоємність води, що становить 4186 Джкг<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>, в 3–4 рази вища за теплоємність

грунту, через що вона повинна отримати більше тепла, ніж ґрунт, для однакового нагрівання. Завдяки цьому вода дуже повільно нагрівається і охолоджується. Здатність води проводити тепло характеризується коефіцієнтом теплопровідності, що дорівнює  $0,627 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{-1}$  (при  $20^\circ \text{C}$ ); разом з теплоємністю цей параметр свідчить про унікальні теплофізичні властивості води. Вода має надзвичайно високу теплоту випаровування. В той час, як для збільшення температури одного грама води на один  $^\circ \text{C}$  необхідно  $0,239 \text{ Дж}$ , для випаровування тієї ж кількості води необхідна енергія, в 540 разів більша. Для замерзання води потрібно  $335 \text{ Дж/кг}$ .

Щодня під впливом сонця земна поверхня втрачає близько  $1230 \text{ км}^3$  води через випаровування з поверхні морів, озер, річок і ґрунту, а також транспірацію (дихання) рослин. Нагрівання сонячним випромінюванням водойм та водяної пари атмосфери призводить до зміни погодних і кліматичних умов.

Амплітуда добових змін температури на озерах становить  $2+5^\circ \text{C}$ , на поверхні океанів —  $0,1+0,5^\circ \text{C}$ . Специфічною особливістю води як середовища є безперервний рух частинок води і турбулентне їх перемішування. Завдяки цьому відбувається передача тепла у глибокі шари.

#### *Оптичні властивості води*

Оптичні властивості води визначаються показниками ослаблення  $\epsilon$ , поглинання  $a$  та розсіювання  $D$  в ультрафіолетовій і видимій ділянках спектра ( $250+800 \text{ нм}$ ) коефіцієнти ослаблення і поглинання мають мінімум в області  $400+500 \text{ нм}$ ; коефіцієнт розсіювання демонструє спад від короткохвильової до довгохвильової області спектра. На оптичні характеристики води можуть впливати розчинені в ній солі та органічна речовина ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), бактеріо-, фіто- і зоопланктон, змулена (гідрозоль) речовина. Оптичні характеристики води пов'язані з її каламутністю, що в свою чергу залежить від розсіювання і поглинання оптичного випромінювання на частинках глини, бруду, кремнію, іржі, а також на водоростях і бактеріях. Оцінку

каламутності здійснюють за допомогою такого приладу як *нефелометр* (від грецького слова *perphos* — хмара). За стандартну одиницю каламутності води беруть *нефелометричну одиницю каламутності (НОК)*, яку отримують на основі використання певної концентрації суспензії полімеру формазину. Так, вода із завислими частинками глини, візуально каламутна, оцінюється 10 одиницями; каламутність поверхневих вод може змінюватися від 10 до 1000 одиниць; в особливо каламутних річках рівень каламутності досягає 10000 одиниць.

### **Забруднення водного середовища**

#### *Механічні забруднення*

Викиди нерозчинних твердих мінеральних речовин також можуть спричиняти забруднення водного середовища. Такі викиди бувають при розробці шахт та кар'єрів. Причиною механічного забруднення водойм може бути полювання, що супроводжується викидами свинцю у вигляді шроту: за один постріл у навколишнє середовище потрапляє 32 г свинцю.

#### *Теплове забруднення*

Високі темпи розвитку енергетики зумовлюють забруднення навколишнього середовища продуктами палива та відходами низькопотенціального тепла. Під час виробництва електричної і теплової енергії понад 60% вихідної енергії розсіюється в докільлі у вигляді підігрітої води та гарячих газів. Експлуатація теплових і атомних електростанцій зумовлює необхідність створення потужних потоків циркуляційної води, що нагрівається при цьому на  $8+10^\circ \text{C}$ . Підвищення температури води призводить до зміни кисневого режиму, збільшення випаровування з поверхні, змін умов існування гідрофауни, гідрофлори і бентосу водойми, викликає «цвітіння» води, призводить до акумуляції стійких забруднювачів. Крім того, з підвищенням температури води пов'язане зменшення вмісту розчинених у ній кисню, азоту, вуглекислого газу. Всі ці зміни гі-

дрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних показників можуть спричиняти несподівані наслідки для водних організмів і загальну зміну екологічного стану водного об'єкта.

### *Евтрофікація водойм*

Процес підвищення рівня первинної продукції водойм внаслідок збільшення в них концентрацій біогенних речовин (азоту, фосфору) називається *евтрофікацією*. Під первинною продукцією слід розуміти насамперед продукцію зелених рослин. Можна виділити такі основні етапи евтрофікації. Спочатку в водоймі накопичуються значні кількості мінеральних солей, що приносяться водами річок та струмків. Збагачення вод поживними елементами сприяє інтенсивному росту водоростей; спостерігаються потужні спалахи фітопланктону. В той же час можлива послідовна зміна популяцій водоростей з переваженням синьо-зелених і зелених водоростей. Збільшення біомаси фітопланктону призводить до погіршення прозорості води; фотосинтез відбувається лише в приповерхневому шарі, оскільки тільки в ньому водорості забезпечуються сонячною енергією. Далі відбувається відмирання значної маси водоростей, що супроводжується значним зменшенням кисню в нижніх шарах водойми. Після повного зникнення кисню починається процес анаеробного (без участі повітря) бродіння.

### *Стічні води*

Водні ресурси можуть забруднюватися каналізаційними або індустріальними викидами. Муніципальні стічні води являють собою складну суміш води (понад 99%) з органічними та неорганічними забруднювачами, суспендованими або розчиненими у воді. Розглянемо основні компоненти стічних вод.

*Мікроорганізми.* При наявності продуктів живлення, достатньої вологості і відповідної температури складаються умови для життєдіяльності мікроорганізмів. Стічні води є ідеальним середовищем для великої

кількості бактерій, вірусів, найпростіших. Більшість цих мікроорганізмів для людини безпечні; функції їх полягають у підтриманні біологічних процесів перетворення органічної речовини в стабільні кінцеві продукти. Але стічні води постачають і патогенні мікроорганізми, що спричиняють виникнення інфекційних захворювань. Водні бактерії викликають холеру, тиф, туберкульоз; віруси — гепатит; найпростіші — дизентерію.

*Тверді речовини.* Сумарні тверді залишки органічної та неорганічної природи визначаються після випаровування рідкої частини при температурі 103 °С. Ці тверді речовини складаються з розчинених та суспендованих компонентів, які оцінюють через процес фільтрування. Для подальшої оцінки твердих субстанцій використовують нагрівання до 550 °С - попіл, що залишається, пов'язують з неорганічною речовиною; втрати речовини — з органічною.

*Неорганічні компоненти.* До цих компонентів слід віднести хлориди і сульфати, азот і фосфор, карбонати і бікарбонати, а також токсичні субстанції, такі як миш'як, ціаніди, важкі метали. Основними джерелами антропогенного забруднення Світового океану солями важких металів (хрому, нікелю, марганцю, цинку, міді, заліза, срібла, свинцю, ртуті, кадмію) є промислові та побутові стічні води. Значна кількість важких металів потрапляє у водне середовище з атмосфери. Більшість важких металів є клітинними отрутами, що уражують морські організми - планктон, ракоподібних, молюсків, риб і врешті потрапляють у людський організм.

*Синтетичні хімічні препарати.* З кожним роком збільшується асортимент пестицидів та поверхнево-активних речовин, використовуваних у сільському господарстві, що потрапляють у Світовий океан внаслідок змиву. Більшість з них є токсичними для морських мешканців. Серед основних наслідків токсичної дії пестицидів слід виділити порушення ферментативних клітинних систем і біологічно активних речовин, зміну різних регуляторних речовин, зниження активності серця, алергійні явища, розвиток різноманітних імунopatологічних процесів. Поверхнево-активні речовини взаємодіють з плазматичною клітинною мембраною і

порушують її функції. Після потрапляння у водне середовище ці речовини порушують процеси самоочищення води, перешкоджають диханню гідробіонтів, активізують процеси накопичення в організмі інших токсичних речовин.

**Органічні речовини.** Білки та карбогідрати становлять 90% органічної речовини стічних вод. Джерелами цих речовин є людські фекалії, харчові відходи, ґрунт, різноманітні мийні засоби і детергенти.

### Контроль якості води

#### Стандарти якості води

Вода характеризується різноманіттю хімічних, фізичних і біологічних субстанцій. З моменту конденсації у вигляді дощу вода розчинює хімічні сполуки, що оточують її в атмосфері, проходить крізь ґрунт, взаємодіє з живими організмами. Саме через це вода має піддаватися обробці для доведення її якості до рівнів, при яких її може споживати людина. Основними критеріями якості води є її фізичні, хімічні і мікробіологічні характеристики.

До *фізичних характеристик* слід віднести смак, запах, колір, каламутність. Смак і запах визначаються наявністю летких хімічних сполук і розкладеної органічної речовини. Колір води залежить від мінеральних субстанцій, таких як залізо і магній, та органічних матеріалів і забарвлених індустриальних відходів. Каламутність пов'язана з завислими у воді частинками, серед яких можуть бути як органічні й неорганічні речовини, так і водні організми.

Специфічною *хімічною характеристикою* води є її жорсткість, яка пов'язана з наявністю у воді карбонату кальцію.

*Мікробіологічні характеристики* води пов'язані з тим, що поверхневі води взаємодіють з агрохімічними препаратами, органічними речовинами, що під впливом розчиненого кисню, азоту і фосфору, світла сприяють виникненню і розмноженню мікрофлори.

Отже, чиста вода — це прозора, прохолодна, приємна на смак, без сторонніх присмаків і запахів, з таким

хімічним складом, при якому тривале й постійне споживання не впливає несприятливо на здоров'я.

### 2.17. Гранично допустимі та рекомендовані концентрації компонентів і показників якості екологічно чистих підземних питних вод (мг/л)

Показник	Води категорії звичайної питної якості, ГДК		Води найвищої питної якості		
	Санітарні норми і правила МОЗ України	Всесвітня організація охорони здоров'я	max	min	Переважаючий діапазон
Мінералізація	1000	1000	600	150	250+400
pH	6+9	—	8	7	7,5+8
Жорсткість загальна (ммоль/л)	7	—	5	2,5	3+4
Лужність (HCO <sup>-</sup> )	—	—	360	90	180+300
Хлориди (Cl)	350	250	30	—	<20
Сульфати (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	500	250	40	—	<25
Кальцій (Ca <sup>2+</sup> )	—	—	100	40	50+70
Магній (Mg <sup>2+</sup> )	—	—	30	6	10+15
Натрій (Na <sup>+</sup> )	200	200	30	—	≤20
Калій (K <sup>+</sup> )	—	—	10	—	5+7
Нітрати (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	45	50	5	—	<5
Нітрити (NO <sub>2</sub> )	3	3	0,01	—	<0,01
Амоній (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	—	1,5	0,05	—	<0,05
Алюміній (Al <sup>3+</sup> )	0,5	0,2	0,05	—	<0,05
Залізо (Fe, сум.)	0,3	0,3	0,1	—	≤0,05
Марганець (Mn, сум.)	0,1	0,5	0,1	—	≤0,02
Мідь (Cu, сум.)	1,0	1,0	0,05	—	≤0,05
Свинець (Pb, сум.)	0,03	0,01	0,01	—	≤0,005
Фтор (F <sup>-</sup> )	1,2+1,5	1,5	1,2	0,6	0,8+1,0
Цинк (Zn <sup>2+</sup> )	5,0	3,0	0,1	—	≤0,1

У табл. 2.17 наведено порівняння вимог щодо води українських Санітарних норм і правил з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я та з опти-

мальними показниками якості води з точки зору її біологічної повноцінності.

### Дезінфекція питної води

У сучасних умовах проблема контролю мікробіологічного та хімічного забруднення питної води вкрай актуальна. Основними джерелами води, якою може користуватися людське суспільство, є поверхневі й ґрунтові води, що істотно різняться за рівнем мікробіологічної якості.

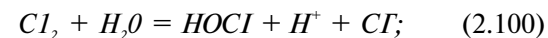
Поверхневі води звичайно більше піддаються впливу мікрофлори, ніж ґрунтові, і нерідко мають досить різні фізико-хімічні властивості. Саме через це щодо поверхневих вод застосовують технології коагуляції (зсідання), флокуляції (утворення та випадання скупчень), седиментації (осідання), фільтрації і дезінфекції.

Ґрунтові води не мають мікробіологічного забруднення завдяки природній фільтрації під час проходження через ґрунт. Але йдеться тут про відносно великі мікроорганізми, такі як водорості, найпростіші, гельмінти. Дрібні ж віруси в ґрунтових водах теж є.

Все це призводить до спалахів багатьох захворювань, причиною яких є присутня в воді мікрофлора. Тільки за період з 1971 по 1985 р. було зареєстровано близько 111000 випадків захворювань, зумовлених забрудненням води, причому половина з них була спричинена фунговими водами. Серед основних збудників цих захворювань слід виділити кишкові віруси. У більшості випадків захворювання провокуються відсутністю або недостатньою ефективністю систем дезінфекції.

Розглянемо засоби дезінфекції питної води та їх порівняльну характеристику.

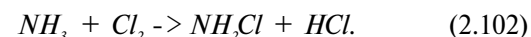
**Хлорування води.** Для того, щоб вилучити з води шкідливі мікроорганізми й речовини, її слід дезінфікувати. Хлорування є найпростішим методом дезінфекції джерел води громадського споживання. Суть методу полягає в обробці води хлором у газоподібному стані для знищення патогенних бактерій. Процес хлорування можна описати хімічними реакціями утворення кислоти:



та її дисоціації на іони водню і гіпохлориту:



Хлор зменшує *pH* води; дезінфікуючі властивості *HOCl* і *OCl* зростають при зменшенні *pH*. При додаванні хлору у воду він окислює органічні й неорганічні речовини. Ефективними, хоча меншою мірою, дезінфектантом є хлорамін — продукт взаємодії хлору з аміаком. Процес додавання аміаку в хлоровану воду для створення хлораміну ( $NH_2Cl$ ) називається *хлорамінуванням*. Цей процес описується реакцією:



Вилучити хлор з води можна за допомогою двоокису сірки ( $SO_2$ ), сульфіту ( $M_2SO_3$ ) або піросульфіту натрію ( $Na_2S_2O_5$ ).

Процес хлорування надійний, відносно недорогий і простий. Недоліком хлорування є властивий йому різкий запах; канцерогенність деяких сполук (тригалогідметанів), що утворюються внаслідок взаємодії хлору з органічною речовиною.

**Озонування води.** Процес обробки води озоном для окислення неорганічних та органічних домішок називається *озонуванням*. Цей процес дуже поширений у Франції і останніми роками починає визнаватися в США.

Перевагою методу порівняно з хлоруванням є його ефективність проти присутнього в воді представника кишкових найпростіших *Cryptosporidium*, який є збудником діареї, черевного болю, нудоти. Крім того, процес озонування не супроводжується неприємним запахом або утворенням небезпечних для здоров'я людини сполук. До недоліків методу можна віднести його нездатність забезпечити абсолютне знищення мікрофлори. Так, фільтраційний завод в Лос-Анджелесі, США, з потужністю 2000-10<sup>6</sup> л/добу має одну з найбільших систем озонування, але воду тут усе-таки хлорують перед розподілом.



Ультрафіолетове опромінювання води. Серед відомих методів дезінфекції поверхневих вод слід назвати використання двоокису хлору та хлорамінів. Проте не всі з цих технологій можуть бути застосовані для дезінфекції ґрунтових вод через слабкий вплив на віруси та хімічні сполуки, що все-таки залишаються у воді. Озонування ефективніше пригнічує вірусну флору, але воно спричиняє появу у воді небажаних побічних продуктів, таких як органічний вуглець, що зумовлюватиме інтенсивний розвиток бактерій. Необхідність фільтрації значно здорожчує процес дезінфекції.

## 2.18. Дози ультрафіолетового випромінювання, які використовуються при дезінфекції

Мікроорганізм	Доза, (мкВт·с)/см <sup>2</sup>
<b>Бактерії</b>	
<i>E.coli</i>	3000
<i>Salmonella typhi</i>	2500
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5500
<i>Salmonella enteritis</i>	4000
<i>Shigella dysenteriae</i>	2200
<i>Shigella paradysenteriae</i>	1700
<i>Shigella flexneri</i>	1700
<i>Shigella sonnei</i>	3000
<i>Staphylococcus aureus</i>	4500
<i>Legionella pneumophila</i>	380
<i>Vibrio cholerae</i>	3400
<b>Віруси</b>	
<i>Poliovirus 1</i>	5000
<i>Coliphage</i>	3600
<i>Hepatitis A virus</i>	3700
<i>Rotavirus SA 11</i>	8000
<b>Найпростіші</b>	
<i>Giardia muris</i>	82000
<i>Acanthamoeba castellanii</i>	35000

Альтернативним розв'язанням цієї проблеми є застосування ультрафіолетового випромінювання для дезінфекції поверхневих і ґрунтових вод, що забезпечує ефективне пригнічення вірусів, бактерій, патогенних найпростіших і в той же час не залишає побічних продуктів, економічно вигідне. Практична реалізація цієї технології базується на застосуванні ультрафіоле-

тового випромінювання в діапазоні 240-280 нм, в якому найкраще виявляється його бактерицидна дія. Інактивація мікроорганізмів пропорційна інтенсивності / ультрафіолетового випромінювання і тривалості т

опромінювання. Добуток *I*-х називається дозою. Для процедури дезінфекції потрібні відносно невеликі дози — величини їх наведено в табл. 2.18. Як джерела ультрафіолетового випромінювання використовують ртутні лампи малого і середнього тиску. У той же час ультрафіолетове опромінювання не дуже ефективно при обробці каламутних вод.

## ЕДАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА

Едафічні фактори середовища включають всю сукупність фізичних і хімічних властивостей ґрунтів, здатні справляти екологічний вплив на живі організми.

### Основні характеристики ґрунту

#### Склад ґрунту

Ґрунт містить такі основні компоненти:

**Неорганічні мінеральні частини**, що складаються з алюмінію, кремнію та інших мінералів, розміри яких варіюють від маленьких частинок глини (0,002 мм) до значно більших гранул піску, гальки та гравію. Кількість цих частинок та їх структура визначають водотримуючу здатність ґрунту, доступність до нього повітря й поживних речовин.

**Органічні залишки**. Рештки рослин і тварин переходять через кілька стадій розкладання в стабільну субстанцію — гумус.

**Вода** є необхідним компонентом для активності мікроорганізмів. Кількість води в ґрунті залежить від опадів, структури ґрунту та заселеності мікроорганізмами. Вода міститься в порах ґрунту та поглинається поверхнею частинок сухого ґрунту. Різноманітні поживні речовини розчиняються у воді і стають доступними для мікроорганізмів.

*Гази*, основними з яких є кисень й азот, а також двоокис вуглецю, заповнюють пори ґрунту, не зайняті водою. В насиченому ґрунті невелика кількість газів може бути розчинена у воді.

*Біологічні системи* включають корені рослин, дрібних тварин та мікроорганізми. Один грам ґрунту містить 2,5 млн бактерій, 500000 грибів, 50000 водоростей та 30000 найпростіших.

### **Хімічні властивості ґрунту**

*Гумус*. Цей хімічний компонент ґрунту є аморфною темнокольоровою субстанцією, що складається із решток рослин (меншою мірою — тварин). До складу гумусу входять гумінові і фулькові кислоти, а також гуміни — нерозчинені залишки цих кислот. Гумінові

### **2.19. Вміст та співвідношення груп гумінових кислот (ГК) і фульвокислот (ФК) у складі гумусу ґрунтів**

Ґрунт	Гумус, %	Група кислот			Опади за рік, мм	Середня температура, °C (найвища/найнижча)
		гумінові кислоти	фульвові кислоти	ГК/ФВ		
Підзолисті	2,5+4,0	12+20	25+28	0,6+0,8	500+600	(15+19)/-10
Сірі лісові	4,6+6,0	25+30	25+27	1,0	500+550	18/-10
Чорноземи потужні і звичайні	7,0+10,0	35+40	15+20	1,5+2,5	400+450	24/-10
Гемно-каштанові	3,0+4,0	30+35	20	1,5+1,7	300+350	25/-10
Бурі пустельно-степові	1,0+1,2	15+18	20+25	0,5+0,7	200+250	27/-1,5
Сіроземи типові	1,5+2,0	20+30	25+30	0,8+1,0	350	22/6
Чорноземи	4,0+6,0	15+20	22+28	0,6+0,8	2400	(15+18)/-10
Червоноземи	3,0	12	30	0,4	1100	20/9
Латеритні	4,0		34	0,2	1900	28,9/15,5

кислоти являють собою групу високомолекулярних сполук. Фулькові кислоти відрізняються від гумінових більшим вмістом кисню і меншим — вуглецю та азоту.

Склад гумусу істотно залежить від місцевих умов, вмісту оксидів і температури (табл. 2.19).

*Оксиди заліза*. Численні сполуки заліза в ґрунті впливають на колір останнього. Наявність і тип оксидів заліза в ґрунті залежать від багатьох факторів — насамперед від режиму вологості, вмісту кремнієвих мінералів, інтенсивності вилугування, характеру гумусу і його накопичення.

*Карбонати і розчинені солі*. На забарвлення ґрунту значною мірою впливають світлозабарвлені та білі субстанції, до складу яких входять карбонати, кварц, каолінит і деякі розчинені солі. Крім того, до цієї групи компонентів можна віднести такі мінерали, як польовий шпат, кальцит, кристали гіпсу та світлозабарвлені сполуки алюмінію.

### **Фізичні властивості ґрунту**

*Розміри частинок*. Згідно з класифікацією, запропонованою Міжнародним товариством з вивчення ґрунтів, розрізняють такі класи ґрунтів за розмірами частинок: глина - до 0,002 мм; мул — 0,002+0,02 мм; дрібний пісок — 0,02+0,2 мм; великий пісок — 0,2+2,0 мм; гравій — понад 2,0 мм. Частинок, менші за 1 мкм, називають *колоїдними*. Структура ґрунту визначається співвідношенням піску й глини. Наявність у ґрунті піску впливає на аерацію ґрунту та вміст у ньому води. Глина утримує воду, але не забезпечує належної аерації ґрунту.

*Колір ґрунту*. Ґрунти бувають різних кольорів, що залежать від властивостей цих ґрунтів. Відмінності в кольорі можуть бути пов'язані з рядом факторів, що витікають з теплового балансу та хімічного складу ґрунту. Ґрунту, що містить багато гумінових кислот, властивий темний ахроматичний колір, тоді як за переважаання фулькових кислот він має більш насичений колір.

*Вологість ґрунту*. Опади, що просочилися у ґрунт, забезпечують наявність певної вологи в рідкому, твердому (лід) і пароподібному стані. Кількість цих опадів залежить від водопроникності ґрунту, а швидкість

просочення — від механічних властивостей — розміру пор і структури. Так, частинки ґрунту розміром понад 10 мм і значним вмістом пилу (= 0,25 мм) гірше пропускають воду, а розміром 0,25+10 мм забезпечують добре проникнення води в поверхневі й глибокі шари ґрунту. Здатність ґрунту вміщувати і утримувати ту чи іншу кількість води називається *вологоємністю*, а вбирати і утримувати на поверхні частинок пароподібну вологу — *гігроскопічністю*.

Якщо пори ґрунту мають розміри до 2 мм, на воду діють капілярні сили; при заповненні водою пор розміром понад 2 мм на неї діють гравітаційні сили.

#### Забруднення ґрунту

##### Хімічне забруднення ґрунту

Одним з основних забруднювачів ґрунту є сільськогосподарське виробництво. Стоки із залишками пестицидів і добрив, нафтопродукти, важкі метали, поверхнево-активні речовини, хімічні сполуки — все це потрапляє в ґрунт, мігрує і в решті-решт опиняється в організмі людини. Застосування добрив призводить до порушення біогеохімічних кругообігів; використання пестицидів супроводжується токсичним впливом на фауну і флору, негативними наслідками для окремих видів і біоценозів в цілому, скороченням чисельності популяцій, зменшенням запасів їжі, зникненням видів, що конкурують, зміною різноманіття біоценозів. Особливу небезпеку для ґрунту становлять військова техніка й арсенали, військові полігони, нагромадження звичайних та ядерних боєприпасів.

##### Тверді відходи

Під терміном *тверді відходи* розуміють покидьки або сміття, що не транспортуються за допомогою води і не призначені для подальшого використання. До муніципальних (міських) твердих відходів можна віднести харчові залишки; крім того, текстиль та негорючі речовини — скло, метал, цегла. Специфічними відходами

є будівельні уламки, листя, вуличне сміття, залишені автомобілі, стара побутова техніка тощо. До твердих відходів можна додати попіл, що залишається внаслідок експлуатації теплових електростанцій, бруд з очисних споруд, гній з ферм, породу з шахт. Тенденція до зростання твердих відходів з кожним роком посилюється (рис. 2.81).

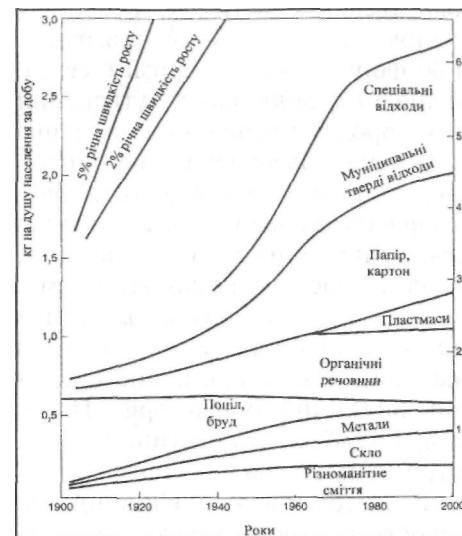


Рис. 2.81. Тенденція до зростання твердих відходів з часом

##### Ерозія ґрунтів

Руйнівний вплив на родючий ґрунтовий покрив і підстилаючі породи таких зовнішніх факторів як вітер і вода, що призводять до переміщення і перевідкладення продуктів руйнування, називається *ерозією ґрунтів* (від латинського *erosio* — роз'їдати, вигризати).

Ерозія, що супроводжується руйнуванням поверхні землі, формуванням долин річок, схилів, межирічч, називається *природною (геологічною)*. На цей тип ерозії впливають такі фактори як вітер, вода, температурні коливання, біологічні процеси. Під час вітрової ерозії відбувається перенесення дрібних частинок ґрунту, що містять найважливіші для родючості компоненти — гумус, хімічні речовини. Крім того, цей процес супроводжується оголенням коріння одних та засипанням інших рослин. Водна ерозія спричиняється талими, дощовими та зливовими водами на пересіченій місцевості; цей процес супроводжується також перенесен-

ням твердих частинок, розчиненням породи водою, зміною рельєфу земної поверхні. Найбільш небезпечною формою водної ерозії є селі і зсуви. Температурні коливання викликають утворення розколин у скельних породах і відшарування. Зміна дня й ночі впливає тільки на поверхневий шар скелі, тоді як перехід від літа до зими — на значно глибші шари. При низьких температурах відбувається руйнування породи внаслідок розширення води в тріщинах. Через замерзання і танення частинки, що відокремилися, рухаються до низу схилом. Зумовлюють руйнування гірських порід також живі організми — лишайники та мохи. Однак найчастіше живі організми лише прискорюють руйнівний вплив інших факторів. Тварини, рухаючись ґрунтом, подрібнюють частинки, що полегшує знесення їх вітром або водою.

Розвиток ерозії пов'язаний також з рельєфом місцевості, стійкістю ґрунту проти змиву та розмиву, наявністю на схилах лісової або трав'янистої рослинності.

*Прискорена (антропогенна) ерозія* зумовлюється одночасним впливом вирубування лісів, надінтенсивним тваринництвом і неправильним використанням ґрунтів під сільськогосподарські потреби. Оранка, сінокосіння та збирання врожаю, робота сільськогосподарських машин, меліорація земель, знищення лісів, надмірне розорювання території, безконтрольне випасання худоби сприяють прискореній ерозії. Шар ґрунту, що руйнується за природної ерозії протягом століть, за антропогенної знищується за «дуже короткі проміжки часу (швидкість антропогенної ерозії може бути в 100 разів більшою, ніж природної).

Ерозія ґрунтів проявляється у вигляді змиву верхнього ґрунтового покриву або розмиву його вглиб. З огляду на це розрізняють *площинну (поверхневу)* та *лінійну ерозії*. Найбільш небезпечною є площинна ерозія. Вона завдає великої шкоди народному господарству, оскільки під дією стікаючих дощових і талих вод схилом змивається і переноситься верхня, найбільш родюча частина ґрунту. Лінійна ерозія проявляється в утворенні ярів та балок.

Для оцінки ерозійної небезпеки земель використо-

вують *індекс опадів* — показник, що умовно враховує кінетичну енергію дощів за певний період максимальної інтенсивності їх випадання. Період, для якого розраховується ерозійний індекс опадів, приймається рівним 10, 20, 30 хв. Кінетична енергія дощу визначається за формулою:

$$E_k = \sum^n [24,73 + 8,94 (\lg 2,36 I) h], \quad (2.103)$$

де  $n$  — число періодів з постійною інтенсивністю дощу,  $I$  — інтенсивність дощу, мм/хв,  $h$  — шар опадів, що випадає за період з постійною інтенсивністю дощу, мм. Шляхом добору за метеорологічними даними відповідного відрізка часу за конкретну зливу, що давала найбільший шар опадів, розраховують максимальну інтенсивність дощу за 10, 20, 30 хв, яку ділять на тривалість періоду, а також кінетичну енергію кожного дощу. Ерозійний індекс опадів розраховують за формулою:

$$R = 0,01 E_k I_{(10, 20, 30)}. \quad (2.104)$$

Типові значення ерозійного індексу опадів, характерних для України, наведено в табл. 2.20.

## 2.20. Типові значення ерозійного індексу опадів $R$ , характерних для України

Пункт	Середнє значення $R$	Річний розподіл $R$					
Луцьк	10,3	0,2	1,6	3,0	3,8	2,2	—
Рівне	10,6	0,2	1,7	2,7	3,4	2,6	—
Житомир	11,8	0,2	1,9	3,0	3,8	2,9	—
Київ	11,2	0,2	1,2	2,4	2,8	4,2	0,9
Чернігів	9,2	0,2	0,8	2,3	2,2	3,0	0,7

Внаслідок ерозії на значних площах руйнуються цінні сільськогосподарські угіддя: різко зменшуються гумусові ресурси, вміст азоту, фосфору і калію в ґрунті, що впливає на його родючість, замулюються ріки, канали та водні джерела, зростає розчленування

території ярами, погіршується її гідрологічний режим.

Аналіз матеріалів ґрунтового обстеження, виконаного "Укрземпроектом", засвідчує, що за останніх 20 років кількість еродованих ґрунтів в Україні збільшилась у різних регіонах на 3-26%; площа еродованих чорноземів звичайних — на 15-26%.

## ХІМІЧНІ ФАКТОРИ

### Хімічне забруднення атмосфери

#### *Основні забруднювачі повітря*

*Забруднювачами повітря* називаються субстанції, наявні в атмосфері, що впливають на здоров'я людини, стан тваринного, рослинного світу і мікроорганізмів та спричиняють руйнування матеріалів. Усі забруднення антропогенного походження можна поділити на *глобальні* та *регіональні*. До глобальних належать кислотні дощі, атмосферні гази, радіоактивні забруднення, важкі метали, пестициди. До локальних — забруднення у великих містах (смоги), хімічні сполуки в повітрі промислових зон. До основних забруднювачів цього типу можна віднести частинки, розміри яких не перевищують 10 мкм, що становлять небезпеку для здоров'я людини, а також хімічні сполуки, які можна виявити в атмосфері мегаполісів.

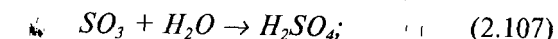
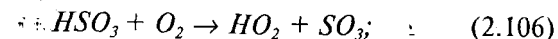
Основними газоподібними забруднювачами атмосфери є вуглекислий газ ( $CO_2$ ), окис вуглецю ( $CO$ ), вуглеводні, двоокис сірки ( $SO_2$ ), похідні азоту ( $NO$ ,  $NO_2$ ), озон ( $O_3$ ), похідні галогенів. До атмосферних частинок можна віднести рідкі й тверді аерозолі. Крім того, забрудненню атмосфери сприяють тверді частинки важких металів, мінералів, органічних і неорганічних речовин, рідкі частинки кислот, нафти, пестицидів, а також частинки біологічного походження. Природними джерелами атмосферних забруднень є виверження вулканів, лісові пожежі, вітрова ерозія, життєдіяльність живих організмів, природна фонові радіоактивність. Причинами антропогенного забруднення є домашнє господарство (готування їжі, прання, миття), комер-

ційна активність (служби побутового сервісу, ресторани, готелі, школи, друкарні), сільське господарство (ґній, пестициди, добрива, нітрати, важкі метали, поверхнево-активні речовини), промисловість (високотемпературні виробничі процеси, згорання палива, діяльність паперових заводів, підприємств з переробки нафтопродуктів, металургійні процеси), транспортні засоби.

У цілому атмосферні забруднення впливають на клімат планети, на біогеохімічні цикли, на рослинні види і фітоценози, на тварин і, безсумнівно, на здоров'я людини.

#### *Кислотні дощі*

Термін *кислотні дощі* вперше було запропоновано британським ученим Робертом Смітом. Джерелом кислотних дощів є гази, що значною мірою змінюють свою концентрацію — сірководень та окиси азоту. Зазначені гази потрапляють в атмосферу природним шляхом та внаслідок життєдіяльності людини. Сірка потрапляє в атмосферу за руйнування біосфери, вулканічної діяльності, випаровування води з поверхні океанів. Азот надходить в атмосферу внаслідок ґрунтової емісії окису азоту, грозівих розрядів, горіння біомаси, спалювання природного палива, роботи двигунів внутрішнього згорання. Всі ці гази розширюються у вертикальних і горизонтальних напрямках; під час цих переміщень забруднюючі речовини зазнають певних фізико-хімічних перетворень завдяки індукованим сонячним світлом хімічним реакціям. Результатом цих реакцій є утворення сірчаної або азотної кислот. Сухі речовини та вода в рідкому чи твердому стані, що випадають із атмосфери за седиментації або опадів і містять в собі азотну й сірчану кислоти, є кислотними дощами. Утворюються ці дощі внаслідок потрапляння в атмосферу промислових викидів окисів сірки ( $SO_2$ ) та азоту ( $NH_3$ ). Ці оксиди перетворюються в частинки сульфатів і нітратів, які в комбінації з водяною парою дають сірчану і азотну кислоти на основі таких хімічних реакцій:



Звичайний дощ має рівень  $pH = 5,6$ ; нинішній кислотний в Північній Америці і Європі — 4,0, а інколи й 3,0.

Кислотні сполуки сірки та азоту потрапляють на поверхню Землі; вони негативно впливають на мешканців водних (риба, зоопланктон, водорості, водні рослини) і наземних (ліси, сільськогосподарські угіддя) екосистем; спричиняють погіршення якості питної води, корозію водонесних труб, руйнування архітектурних будівель і споруд. Статистичними дослідженнями встановлена пряма залежність між концентрацією двоокису сірки та кількістю захворювань дітей на несправжній круп і смертністю людей внаслідок хвороб дихальних шляхів.

### Смог

Одним з поширених видів забруднень атмосфери є *фотохімічний смог* — специфічний туман з вологістю близько 70%, що являє багатокомпонентну суміш газів та аерозолей. До складу смогу входять озон, оксиди азоту та сірки, органічні сполуки. Всі вони називаються *фотооксидантами*, оскільки беруть участь у фотохімічних реакціях розкладання забруднювачів сонячним випромінюванням. Смогу сприяє висока концентрація забруднювачів, інтенсивність сонячного випромінювання та слабкий повітряний обмін. Одним з основних компонентів смогу — двоокис азоту — присутній в автомобільних викидах. Яскравим прикладом можливої ситуації, що призводить до смогу, є розташування Лос-Анджелеса — міста, оточеного горами, що заважають циркуляції повітря. Інтенсивне використання автотранспорту створює тут ідеальні умови для

виникнення смогу (приблизно 270 днів за рік). Смог впливає на здоров'я людини, оскільки є небезпечним для дихальної та кровоносної систем, викликає задуху, подразнення слизових тканин. У 1952 р. смог, що тривав 4 дні, став причиною смерті 4000 мешканців Лондона. Максимальна концентрація  $SO_2$  тоді становила 1,34 млн<sup>л</sup> (3510 мкг/м<sup>3</sup>), що на порядок перевищує норми, передбачені стандартами якості повітря. Смог негативно впливає на рослини й сільськогосподарські угіддя.

### Забруднення навколишнього середовища нафтою і нафтопродуктами

#### Склад і властивості нафти

Сира нафта — горюча масляниста рідина зі специфічним запахом. Залежно від місця видобування колір її змінюється від світло-коричневого до темно-бурого. Основними компонентами нафти є вуглеводні та їх похідні. Співвідношення парафінів, нафтенів та ароматичних вуглеводнів у нафті залежить від її сорту. Основні фізичні характеристики нафти порівняно з морською водою наведено в табл. 2.21.

#### 2.21. Фізичні властивості нафти порівняно з морською водою

Об'єкт	Густина, $\rho \cdot 10^3$ кг·м <sup>-3</sup> (при 22 °C)	Кінематична в'язкість, $\eta \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> ·с (при 22 °C)	Коефіцієнт поверхневого натягу, $\sigma \cdot 10^{-3}$ Н·м <sup>-1</sup>	Теплопровідність, $k$ Вт·м <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	Відносна діелектрична стала, $\epsilon$	Показник заломлення, $n$
Нафта, діапазон величин	0,700+ 1,007	0,67+2970	20+37	0,1130+ 0,2261	1,85+ 2,94	1,40+ 1,58
Середнє значення для сирової нафти	0,857	90	28	0,1381	2,0	1,44
Морська вода	1,024	1,04	73,02	0,6280	7,8	1,34

### *Шляхи забруднення навколишнього середовища нафтою і нафтопродуктами*

У процесі добування, виробництва, обробки, транспортування та використання нафти і нафтопродуктів забруднюються майже всі компоненти біосфери. В атмосферу потрапляють вуглеводні,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $NO_x$ . Транспортування нафти за допомогою танкерів може супроводжуватись її виливанням внаслідок аварій. При цьому десятки тисяч тонн нафти або її продуктів потрапляють у водне середовище. Крім того, можливі викиди нафтопродуктів і мастильних матеріалів, які споживає морське судноплавство. Значна кількість нафти потрапляє в моря з річковими стоками. Частинки нафти та нафтопродуктів потрапляють при цьому і в ґрунт.

Нафта — один з найпоширеніших видів природної сировини ХХ ст. На початку вона застосовувалася переважно для одержання пального, а згодом стала основою для розвитку потужної галузі хімічної промисловості — нафтохімії. Вчені вважають, що при сучасному рівні споживання нафти запаси її на суші вичерпаються вже на початку ХХІ ст. Видобуток морської нафти зростає дуже швидко. Вважається, що врешті морські свердловини даватимуть третину всієї нафти, оскільки морські запаси її оцінюються в 60—150 млрд т.

Щорічно майже 6000 танкерів перевозять 3 млрд т нафти. Дедвейт (повна вантажопідйомність судна з урахуванням палива) найбільших сучасних танкерів досягає 500 тис. т. Ці судна становлять колосальну потенційну небезпеку для навколишнього середовища у випадку аварії. Підраховано, що 200 тис. т нафти вистачило б на те, щоб перетворити Балтійське море в біологічну пустелю. Оцінки свідчать: на кожних 11600 рейсів закономірно припадає одна велика катастрофа, приблизно один раз на 13 років, причому найбільш вірогідним районом такої катастрофи буде західне узбережжя США — від Аляски до Каліфорнії.

Морське судноплавство, що споживає нафтопродукти як пальне і мастильні матеріали, теж є постійним джерелом забруднення водного середовища. Кіль-

кість нафти і нафтопродуктів, що потрапляють таким способом у Світовий океан, у багато разів перевищує кількість нафти «аварійних» розливів. Тобто основна маса нафти потрапляє в море не під час аварій танкерів, а внаслідок навмисного зливання з суден забруднених баластних (трюмних) і змивних вод. За сучасними оцінками, щороку внаслідок втрат нафти на морських промислах, промивання танків і трюмів суден, зливання баластних вод у море скидається від 5 до 10 млн т нафтопродуктів. Інакше кажучи, людина вносить в океан в 15 разів більше нафти, ніж її надходить туди з природних джерел.

### *Вплив нафти на живі організми*

Вплив нафти на мешканців водного середовища слід пов'язати з механічними факторами, що призводять до порушення життєдіяльності організму — процесів дихання, живлення, а також перешкоджають пересуванню, викликають погіршення жирового змазування птахів та їх переохолодження. Нафтова плівка спричиняє порушення таких природних процесів як газообмін, випаровування, утворення внаслідок впливу ультрафіолетового випромінювання вільних радикалів тощо. Причому, нафтова плівка на водній поверхні може зберігатися роками.

Крім того, нафта та її компоненти можуть справляти токсичний вплив на гідробіонтів, впливати на розвиток фіто- і зоопланктону, личинок морських організмів та ікру риб. Компоненти нафти здатні потрапляти у тканини тварин і спричиняти зміну біохімічних та фізіологічних процесів. Звичайно м'ясо риб і молюсків, що певний час контактували з нафтою, має специфічний запах і присмак.

Одна з форм забруднення Світового океану нафтою — нафтові агрегати, так звані пелагічні смоли або смоляні кульки. Вони являють собою в'язкі структуровані грудочки, пластівці або дрібні частинки. Розмір їх варіює від частин міліметра до кількох сантиметрів, густина — від 0,7 до 1,0 г/см<sup>3</sup>. До їх складу входять нафтові вуглеводні з кількістю атомів вуглецю від 15 до 35. Бу-

дучи досить стійкими утвореннями, вони можуть забруднювати як морську поверхню, так і товщу води.

До продуктів, що утворюються в результаті переробки і використання нафти й нафтопродуктів, що становлять безпосередню загрозу здоров'ю людини, належать також сполуки поліциклічних вуглеводнів, зокрема бенз(а)пірен, що є сильним канцерогеном. Ароматичні вуглеводні зазвичай концентруються у поверхневому мікрошарі води, де вміст їх на порядок вищий, ніж на глибині 1 м. В організм людини бенз(а)пірен, що забруднює води Світового океану, може потрапляти харчовим ланцюгом.

Таким чином, довготривале забруднення біосфери нафтою й нафтопродуктами можна розцінювати як реальну екологічну катастрофу.

#### Методи контролю нафтової плівки

Розглянемо один з методів контролю забруднення водного середовища нафтою. Суть *ємнісного методу*

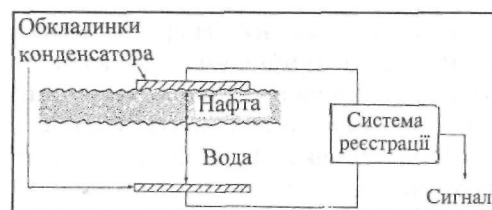


Рис. 2.82. Ємнісний метод вимірювання товщини нафтової плівки

вимірювання товщини нафтової плівки на поверхні води наведено на рис. 2.82. Шар нафти і морської води являють собою діелектрик, розміщений між обкладками конденсатора, ємність якого  $C$  визначається за формулою:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_a}, \quad (2.109)$$

де  $C_n$  і  $C_a$  — ємність нафти і води відповідно.

Різниця потенціалів  $U$  між обкладками конденсатора дорівнює:

$$U = \frac{K}{C} = K \left( \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_a} \right) = K \left( \frac{d_n}{\epsilon_n S_n} + \frac{d_a}{\epsilon_a S_a} \right), \quad (2.110)$$

де  $d_n$  і  $d_a$  — товщини шарів нафти і води;  $S_n$  і  $S_a$  — площі поверхонь нафти і води;  $K$  — константа.

Останній вираз можна переписати як:

$$U = K t_n \left( \frac{1}{\epsilon_n S_n} + \frac{1}{\epsilon_a d_n S_n} \right). \quad (2.111)$$

З урахуванням того, що  $S_n = S_a = S$ , можна отримати вираз:

$$U = \frac{K t_n}{\epsilon_a S} \left( \frac{\epsilon_a}{\epsilon_n} + \frac{d_a}{d_n} \right). \quad (2.112)$$

Мета цієї процедури — вимірювання  $d_n$ . Типові значення діелектричної проникності нафти і води становлять  $\epsilon_n = 80$ ;  $\epsilon_a = 2$ . Перший член в останньому рівнянні в 40 разів більший, ніж другий, яким можна через це знехтувати.

Отже,

$$U = \frac{K t_n}{\epsilon_n S}. \quad (2.113)$$

або

$$t_n = \frac{\epsilon_n S U}{K}. \quad (2.114)$$

При транспортуванні, обробці і продажу нафти і нафтопродуктів можливе використання таких одиниць:

1 барель = 0,15891 м<sup>3</sup> (при 15 °C); 1 м<sup>3</sup> = 6,293 бареля;  
1 л = 0,264 галона; 1 барель = 42 галона.



## Транспортні засоби і навколишнє середовище

Серед основних джерел антропогенного хімічного забруднення транспортні засоби постачають в атмосферу близько третини летких органічних речовин (вуглеводнів), окисів азоту, свинцю і більш ніж дві третини окису вуглецю. Сучасне суспільство неможливо уявити без автомобільного транспорту; парк автомобілів зростає з кожним роком. Автомобіль змінює атмосферу міст внаслідок викидів газів, що містять токсичні речовини. Так, 75% свинцю, що міститься у високооктановому бензині у вигляді тетраетилу свинцю, переходить в атмосферу; кожний автомобіль протягом року викидає в повітря 1 кг цього металу. Крім того, двигун внутрішнього згорання постачає 350 г інших токсичних речовин на кожний літр використаного пального. Серед них одне з основних місць поєдає окис вуглецю; тільки в США автотранспорт викидає щорічно і 02-10<sup>6</sup> т цього газу. Заміна мастила в автомобілях, витікання його з картерів, розливання бензину або дизельного пального під час заправки автомобілів — усе це призводить до забруднення водних джерел і водоносних шарів ґрунту. А проникність бензину в ґрунт у сім разів вища, ніж води; навіть такі мізерні концентрації бензину як 1 млн<sup>-1</sup> здатні зробити непридатною для споживання значну кількість фунтових вод. Розподіл забруднень, спричинених автомобільним двигуном, наведено в табл. 2.22, а на рис. 2.83 зобра-

2.22. Розподіл забруднень ( мг/м<sup>3</sup> ), які викидає автомобільний двигун

Компонент	Двотактні двигуни		Чотиритактні двигуни	
	холостий хід	100%-не навантаження	холостий хід	100%-не навантаження
Двоокис вуглецю	1,7	2,2	1,2	2,1
Оксид вуглецю	1100	1100	700	1300
Акролеїн	24	31,2	2,9	0,86
Оксиди азоту	650	900	90	87
Двоокис сірки	1600	1700	1800	1800
Сажа	0,18	0,09	0,12	0,07
Паливна пара	3	25	3	25

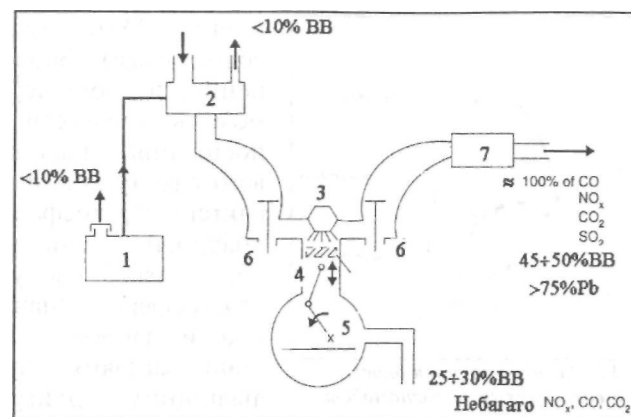


Рис. 2.83. Можливі шляхи виходу забруднювачів в атмосферу під час роботи автомобільного двигуна: 1 — паливний бак; 2 — карбюратор; 3 — джерело іскри; 4 — циліндр; 5 — поршень; 6 — клапан; 7 — глушник; BB — вуглеводні

жено можливі шляхи потрапляння забруднювачів в атмосферу під час роботи двигуна. Експлуатація кислотних акумуляторних батарей спричиняє виділення водню, кисню, вуглекислого газу, а також аерозолів сірчаної кислоти. Запобігти забрудненню атмосфери викидними газами можна за вдосконалення камери згорання та її елементів, зменшення рівня шкідливих домішок у відпрацьованих газах, нейтралізації токсичних компонентів цих газів. Як приклад можна навести процес зменшення рівня оксидів азоту в автомобільному двигуні за зниження температури циліндрів, модифікації системи запалювання, впровадження рециркуляції викидних газів. На рис. 2.84 зображено вплив рециркуляції на вміст окисів азоту в викидних газах автомобіля. Автомобіль є джерелом не тільки хімічного забруднення атмосфери, а й постачальником постійного монотонного шуму, різких звуків, сигналів, скреготу під час гальмування.

Авіаційний транспорт також вносить певні зміни в навколишнє середовище. По-перше, польоти надзвукових транспортних літаків сприятимуть підвищенню вмісту вологості в стратосфері. Крім того, літаки забруднюють стратосферу газами (CO, NO, SO<sub>2</sub>) та аеро-

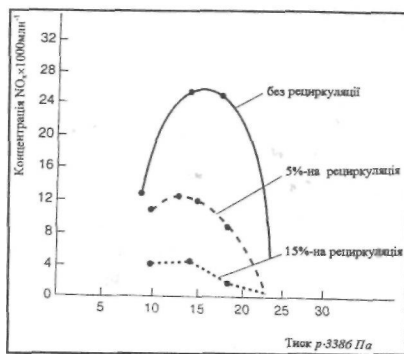


Рис 2.84. Зменшення рівня окисів азоту в вихлопних газах автомобіля за рахунок рециркуляції

золями ( $SO_x$ , вуглеводні, сажа). Забруднення, в свою чергу, можуть призвести до посилення парникового ефекту, зміни характеру стратосферної хмарності, зниження концентрації озону в стратосфері. Значної шкоди здоров'ю людини завдають шуми авіаційних ДВИГУНІВ Поблизу аеропортів.

### Контроль якості повітря

#### Стандарти якості навколишнього повітря

Стандарти якості повітря для певних забруднювачів визначають за допомогою дозових кривих, що характе-

#### 2.23. Стандарти якості навколишнього повітря в США і Канаді

Забруднювач	США		Канада		Тривалість дії
	$C, \text{мкг/м}^3$	$C, \text{млн}^{-1}$	$C, \text{мкг/м}^3$	$C, \text{млн}^{-1}$	
Частинки розміром <10 мкм	150	—	—	—	24 год.
$SO_2$	365	0,14	260	0,10	24 год.
CO	10000	9	14450	13	8 год.
$NO_2$	100	0.053	—	—	за рік
	—	—	125	0,10	24 год.
$O_3$	235	0,12	157	0,08	1 год.
Свинець	1,5	—	—	—	4 рази на рік
			5,0	—	24 год.
Флуориди	—	—	40÷100	—	30 днів
			$\text{см}^3$		

ризують залежність концентрації забруднювача, що впливає на стан живого організму, від тривалості дії забруднювача. В різних країнах діють свої стандарти. Наприклад, у табл. 2.23 наведено стандарти якості повітря США і Канади для певних забруднювачів.

## Глава 3. БІОТИЧНІ ФАКТОРИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІЗМІВ

### Класифікація біотичних факторів

*Біотичні фактори* — це сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також на неживе середовище мешкання. Взаємодію між організмами позначають за допомогою простого кода, в якому кожний з пари організмів, які взаємодіють, представлений знаками «+» (покращення росту, виживання та інша користь для популяції), «—» (вповільнення росту і погіршення інших характеристик) або «0» (відсутність значущих взаємодій) залежно від впливу, який справляє на нього інший організм.

До основних біологічних факторів належать нейтралізм, інтерференційна конкуренція, експлуатаційна конкуренція, аменсалізм, хижацтво, паразитизм, протокооперація, коменсалізм та мутуалізм. Виникнення негативних взаємодій, що переважають позитивні, характерніше для початкових стадій розвитку екосистем чи при їх зміні (у старих екосистемах воно менш імовірне); у процесі розвитку екосистем негативні взаємодії поступово змінюються позитивними, що підвищують виживання видів, що взаємодіють.

*Нейтралізм* (0 0) (від лат. *neutralis* — середній, нічийний) — це відсутність прямих взаємодій між організмами різних видів в екосистемі, хоча непряма взаємодія може бути (наприклад, білки можуть скидати шишки, насінням яких живляться дрібні гризуни).

*Конкуренція* (—) (від лат. *concurrentia* — змагання, суперництво) — це суперництво, під час якого партнери активно пригнічують один одного; внаслідок конкуренції один організм використовує деякий ресурс

(їжу, воду, світло, простір) і тим самим зменшує доступність цього ресурсу для інших організмів. Конкуренція може бути внутрішньовидовою і міжвидовою. Конкуренція — це негативні взаємодії між організмами, які можуть бути як прямими — *інтерференційна конкуренція* (антибіоз, взаємне пригнічення, перекриття доступу до ресурсу, сутички тощо), так і виникати через прагнення монополізувати певний ресурс чи місце перебування — *експлуатаційна конкуренція*. В останньому випадку виживання виду залежить від зовнішніх умов; так, один вид мучних хрущів — *Tribolium confusum* — витісняє інший — *Tribolium castaneum* — в умовах низької температури та вологості, тоді як другий вид витісняє перший при високій температурі та вологості. Інтерференційна конкуренція спостерігається при винищенні одним родом хрущаків (*Tribolium*) нестатевозрілих стадій іншого (*Oryzaephilus*). Експлуатаційна конкуренція змінюється інтерференційною при зменшенні кількості їжі. *Антибіоз* являє собою крайнє вираження конкурентних взаємовідносин, коли один вид повністю перешкоджає переселенню особин іншого виду, що підтримується хімічним впливом (хімічний антибіоз, або *алелопатія*). Закон *конкурентного виключення*, який полягає у тому, що два види не можуть нескінченно довго займати одну й ту ж еконішу, реалізується при розселенні близькоспоріднених видів у різних географічних районах, витісненні одного виду іншим в інші місця, при переході одного з конкурентів на використання нових ресурсів, при активності споріднених видів, що живуть в одній місцевості, у різний час тощо. Окрім того, виділяють внутрішньовидову (сприяє розширенню меж існування виду) та міжвидову конкуренцію (забезпечує зайняття оптимальних місць, у яких вид має переваги, сприяє утворенню різних еконіш і, таким чином, формуванню нових популяцій, підвидів та видів). Так, при внутрішньовидовій конкуренції сірі лучні полівки за відсутності лісових полівок часто займають лісові середовища існування.

*Аменсалізм* (- 0) (від *a...* і лат. *mensa* — стіл, трапеза): популяція 1 пригнічує популяцію 2, не відчуваючи

при цьому негативного впливу популяції 2. Часто проявляється у формі алелопатії (синьозелені водорості виділяють близько десяти речовин, що пригнічують життєдіяльність зелених водоростей; чапараль виділяє алкалоїди та феноли, що унеможливають існування інших видів на певній відстані від її кущів; ґрунтові гриби виділяють бактерицидні речовини тощо).

*Паразитизм* (+ -) — форма взаємостосунків різних організмів (рослин, тварин, мікроорганізмів), які належать до різних видів, з яких один (паразит) використовує іншого (хазяїн) як середовище мешкання і джерело їжі, причому господар не отримує користі і відчуває шкоду; являє собою варіант антагоністичного співжиття організмів двох видів. Причому паразит може жити за рахунок хазяїна, перебуваючи всередині (*ендопаразитизм*) чи зовні його тіла (*екзопаразитизм*). Залежно від тривалості паразитичних контактів розрізняють тимчасовий (малярійний плазмодій, кліщі, деякі пласкі черви, паразитичні амеби та ін.) та стаціонарний (паразити рослин і тварин, нематоди, хвороботворні бактерії тощо) паразитизм. Виділяють рослиннапівпаразитів, що мають власний фотосинтезуючий апарат, але водно-мінеральний розчин беруть від хазяїна (омела, очанка та ін.).

*Хижацтво* (+ -) — форма антагоністичних взаємовідносин організмів різних видів, наслідком яких є поїдання одного організму (жертви) іншим організмом (хижаком). Особини хижаків, як правило, більші за особин жертв.

*Симбіоз* — форма співжиття організмів різних видів, вигідна для обох (мутуалізм, протокооперація) чи для одного з них (коменсалізм). Поділяється на *облігатний* (мутуалізм, коменсалізм) та *факультативний* (протокооперація, коменсалізм).

*Коменсалізм* (+ 0) (від фр. *commensal* — співтрапезник) — постійне чи тимчасове співжиття особин різних видів, вигідне для одного з них і байдуже для іншого, що базується на використанні спільного простору, субстрату, їжі тощо. Приклади: риби-прилипачі, що вступають у форичні зв'язки з акулою та живляться залишками її їжі; гідроїдний поліп, що живе біля

анального отвору риб та живиться їх екскрементами; види, що живуть в норах морських червів та риючих креветок тощо. До коменсалізму належать *синейкія* (гр. *син* — разом та *ойкос* — місце перебування) — об'єднання організмів без передачі речовин та енергії, часто обумовлене їх проживанням у спільному місці (епіфіти та їх носії, зростання коріння, тварини-поселенці на рослинах і ці рослини та ін.) і *паройкія* — взаємодії, що виникають між організмами, що мають форми захисту, та незахищеними тваринами.

Кодом (+ 0) можна позначити *детритофагію* — здатність організму тварини жити мертвими або частково розкладеними органічними речовинами; організми (гриби, бактерії), що перетворюють мертві органічні залишки в прості сполуки, називаються *редуцентами*.

*Протокооперація* (+ +) (від гр. *прото* — перший та лат. *соорепо* — співробітничая) — взаємовигідне співіснування особин двох видів, що не є обов'язковим. Так, кишковопорожнинні прикріплюються до спин крабів, маскуючи та захищаючи їх, отримуючи від цього шматочки їжі та використовуючи їх як засіб пересування.

*Мутуалізм* (+ +) (від лат. *mutuus* — взаємний) — форма сумісного взаємовигідного симбіозу організмів, при якій існування обох партнерів або одного з них неможливе без взаємозалежного співмешканця. Мутуалізм виникає часто між організмами з дуже відмінними потребами (напр., між авто- і гетеротрофами). Приклади: бактерії-азотфіксатори та бобові рослини; мікориза (корені рослин + міцелій грибів); лишайники (водорості + гриби); жуйні парнокопитні і анаеробні бактерії у їх рубці, що забезпечують розщеплення целюлози; терміти і джгутикові, що живуть у їх кишечнику та розщеплюють целюлозу; тропічні мурахи, що розводять грибні сади на опалому листі (мурахи виділяють протеолітичні ферменти, які сприяють засвоєнню мінеральних речовин листя грибами, останні є їжею для мурах) тощо.

Основні типи біотичних взаємодій популяцій двох видів наведено в табл. 3.1.

### 3.1. Класифікація біотичних взаємодій популяцій двох видів

Тип взаємодії	Види		Загальний характер взаємодії
	1	2	
Нейтралізм	0	0	Жодна популяція не впливає одна на одну
Конкуренція, безпосередня взаємодія	"		Пряме взаємне пригнічення обох видів
Конкуренція, взаємодія через ресурси			Непряме пригнічення при дефіциті спільного ресурсу
Аменсалізм		0	Популяція 2 пригнічує популяцію 1, але сама не відчуває негативного впливу
Паразитизм	+		Популяція паразита 1 складається з менших за величиною особин, ніж популяція 2
Хижацтво	+	-	Особини хижаків 1 зазвичай більші, ніж особини жертви 2
Коменсалізм	+	0	Популяція 1, коменсал, отримує користь від взаємодії; популяції 2 ця взаємодія байдужа
Протокооперація	+	+	Взаємодія сприятлива для обох видів, але не обов'язкова
Мутуалізм	+	+	Взаємодія сприятлива для обох видів і обов'язкова

Тут: «0» — відсутність значних взаємодій; «+» — покращення росту та інша користь для популяції; «-» — вповільнення росту і погіршення умов популяції.

## МЕТОДИ ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІЗМІВ

### Внутрішньовидова конкуренція

Кінетика біологічних процесів вивчає поведінку у часі різноманітних процесів, притаманних живій природі. Будь-яку кінетичну систему можна уявити як сукупність *змінних параметрів*. Змінними є величини, що змінюються з часом; параметри ж підтримують стає значення протягом часу спостереження. Опис характеру поведінки біологічних систем як об'єктів,

що моделюються, зручно робити за допомогою математичних моделей, яким відповідає диференційне рівняння першого порядку:

$$\frac{dx}{dt} = f(x). \quad (3.1)$$

Наприклад, процес загибелі мікроорганізмів описується рівнянням:

$$\frac{dc}{dt} = -bc, \quad (3.2)$$

яке треба розуміти так; зміна концентрації мікроорганізмів  $\frac{dc}{dt}$  у часі пропорційна їх концентрації  $c$ ; тут  $b$  — коефіцієнт загибелі мікроорганізмів; знак «мінус» свідчить про зменшення кількості мікроорганізмів з часом.

Ще один приклад — процес розмноження організмів. Оскільки швидкість розмноження пропорційна вірогідності зустрічі двох організмів різної статі, доцільно описати цей процес рівнянням:

$$\frac{dc}{dt} = ac^2, \quad (3.3)$$

де  $a$  — коефіцієнт розмноження; знак «плюс» свідчить про зростання кількості організмів з часом.

Розглянемо як приклад процедуру моделювання ситуації, що виникає за міжвидової конкуренції. Особи одного виду ростуть і розмножуються за рахунок забезпечення потреб у споживаних ресурсах. Але коли потреби перевищують запаси ресурсів, виникає конкуренція — взаємодія між особинами, яка викликана схожими потребами в обмеженому ресурсі і яка призводить до зниження виживання, швидкості росту та розмноження особин, що конкурують. Нехай деяка попу-

ляція організмів у певний момент часу незначна (точка  $A$  на рис. 3.1); конкуренція відсутня.

Зростання популяції описується законом:

$$N_{t+1} = RN_t, \quad (3.4)$$

де  $\Lambda$  — швидкість відтворення.

У точці  $B$  чисельність зростає настільки, що відбувається конкуренція; відношення  $N/N_+ \neq 1$  (немає зростання). Точка  $K$  називається *граничною густиною насиченості*. Поведінка населеності описується прямою  $AB$ , нахил якої ста-

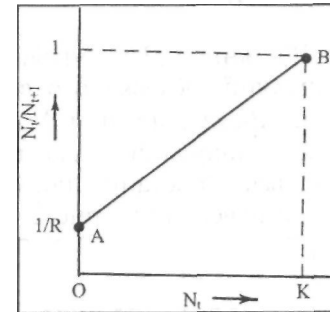


Рис. 3.1. Найпростіша прямолінійна залежність, згідно з якою зростання популяції  $N$ , викликає збільшення відношення  $N_t/N_+$ ,

$$\text{новить } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1 - \frac{1}{R}}{K}$$

Рівняння цієї прямої має вигляд:

$$y = y_0 + kx = y_0 + x \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R} + \frac{1 - \frac{1}{R}}{K} \cdot N_t = \frac{N_t}{N_{t+1}}; \quad (3.5)$$

або:

$$\frac{N_t}{N_{t+1}} = \frac{1 - \frac{1}{R}}{K} \cdot N_t + \frac{1}{R}. \quad (3.6)$$

Звідси:

$$N_{t+1} = \frac{R \cdot N_t}{1 + \frac{(R-1)N_t}{K}}; \quad (3.7)$$

або:

$$N_{t+1} = \frac{R \cdot N_t}{(1 + aN_t)}; \quad (3.8)$$

де  $\frac{R-1}{K} = a$ .

Рівняння (3.8) являє собою модель збільшення популяції, обмеженого внутрішньовидовою конкуренцією. Видно, що при  $N_t < K$  популяція зростає; при  $N_t = K$  — популяція стала; при  $N_t > K$  — популяція зменшується. Зростання популяції з часом у реальній ситуації наведено на рис. 3.2.

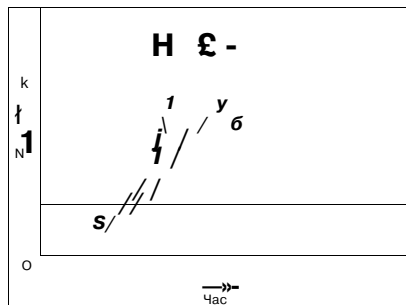


Рис. 3.2. Збільшення популяції  $N$  у часі в реальній ситуації: а. без враховування конкуренції; б. з врахуванням внутрішньовидової конкуренції

У той же час у реальній ситуації більш широкий клас біологічних явищ описується двома диференціальними рівняннями першого порядку. Розглянемо класичний приклад моделі біологічної системи, що описує антагоністичні відносини різних видів, тобто хижацтво. Ця модель складається з двох диференціальних рівнянь і отримала назву *екологічної моделі Больтерра*. Нехай в деякому замкненому районі мешкають жертви (зайці) та хижаки (вовки). Зайці харчуються тільки рослинною їжею, якої завжди вдосталь; вовкам же потрібні тільки зайці.

Можна припустити, що зміна кількості зайців  $\left(\frac{dN_1}{dt}\right)$  пропорційна їх кількості  $N_1$ :

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1. \quad (3.9)$$

Зменшення кількості зайців пропорційне ймовірності зустрічі зайця з вовком, тобто добутку кількостей  $N_1N_2$ . Таким чином, процес зменшення кількості зайців описується рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = -bN_1N_2. \quad (3.10)$$

У цілому зміна кількості зайців з урахуванням їх розмноження та можливості зустрічі з вовками буде описуватися рівнянням:

$$\frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2. \quad (3.11)$$

Аналогічні міркування приводять до висновку, що кількість вовків буде зменшуватися (внаслідок природної смертності) пропорційно їх кількості  $N_2$  і зростати пропорційно ймовірності зустрічі із зайцями  $N_1N_2$ . Зміна кількості вовків опишеться рівнянням:

$$\frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_1N_2. \quad (3.12)$$

Всі ці міркування приводять до системи двох диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= aN_1 - bN_1N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} &= -cN_2 + dN_1N_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Слід зауважити, що кожному стану біологічної системи «зайці-вовки» відповідає певна пара змінних  $N_1$  і  $N_2$ ; у той же час, будь-яка пара значень  $N_1$  і  $N_2$  описує певний стан системи.

Розглянемо можливість графічної інтерпретації вищезгаданого. Нехай є система координат, на осях якої відкладені значення змінних  $N_1$  і  $N_2$ . Кожна точка  $N$

такої площини з координатами  $X$  і  $U$  відповідає певному стану системи (рис. 3.3). Така площина називається

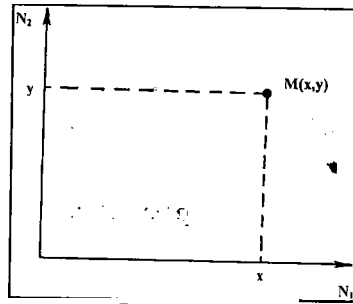


Рис. 3.3. Фазова площина

*фазовою площиною*. Під час зміни стану системи у часі змінні  $X$  і  $U$  змінюються відповідно до системи рівнянь (3.13). Процес зміни  $X$  і  $U$  буде відповідати руху точки  $M(X,U)$ ; сукупність можливих положень цієї точки на фазовій площині називають *фазовою траєкторією*.

Для того, щоб отримати рівняння, що зв'язує безпосередньо  $N_1$  і  $N_2$ , розділимо друге рівняння системи (3.13) на перше, виключивши час  $t$ .

$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{Q(N_1, N_2)}{PW, N_2} \quad (3.14)$$

Рішення цього рівняння дає родину інтегральних кривих (фазових траєкторій) на площині  $N_1, N_2$  (рис. 3.4). Точки, в яких

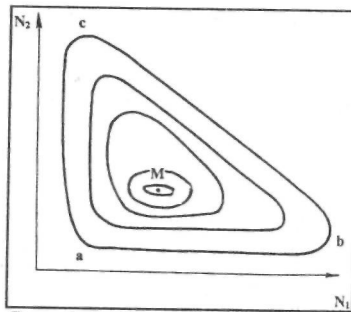


Рис. 3.4. Фазовий портрет

похідні змінних  $\frac{dN_1}{dt}$  і

$\frac{dN_2}{dt}$  перетворюються в нуль, мають назву *особливих точок*. Особлива точка, оскільки швидкості

зміни  $\frac{dN_1}{dt}$  і  $\frac{dN_2}{dt}$  в ній дорівнюють нулю, відповідає *стаціонарному стану*.

Отже, зростання чисельності зайців відповідає руху від точки  $a$  до точки  $b$  на фазовій площині (рис. 3.4); цей процес супроводжується збільшенням чисельності

вовків, що отримали сприятливі умови годівлі; але це зростання чисельності хижаків призводить до зменшення чисельності жертв (перехід  $b \rightarrow c$  на фазовій

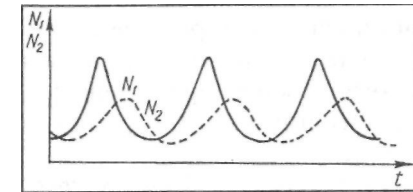


Рис. 3.5. Поведінка змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі

проводить систему на іншу фазову площину.

Поведінку змінних  $N_1$  і  $N_2$  у часі подано на рис. 3.5. Очевидно, максимум чисельності жертв завжди випе-

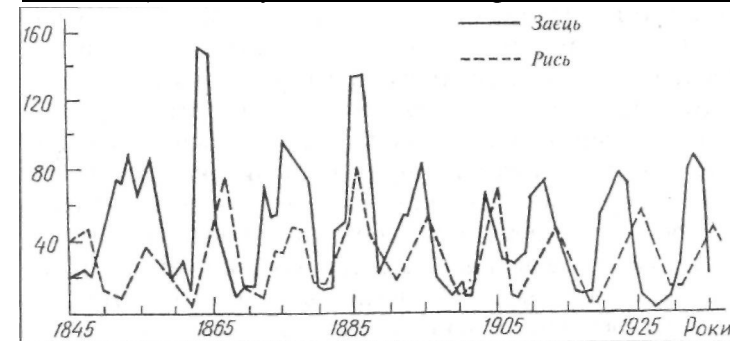


Рис. 3.6. Результати спостережень за коливаннями чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді

реджає максимум чисельності хижаків. З цими кривими узгоджуються результати спостережень за зміною чисельності північноамериканського зайця та рисі в Канаді (рис. 3.6). Періоди змін чисельності жертв та хижаків приблизно однакові і становлять 9-10 років, причому максимум чисельності зайців випереджує максимум чисельності рисей на один рік.

## ВПЛИВ ОРГАНІЗМІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

### Повітряна мікробіологія

Через невисоку вологість атмосфера не є тим середовищем, де можуть жити і розмножуватися мікроор-

ганізми. Однак можливе існування у повітрі мікроорганізмів у вегетативних стадіях. Наприклад, спори бактерій чи грибів можуть існувати в повітрі досить довго. Основним фактором, що сприяє життєдіяльності мікроорганізмів у повітрі, є резистентність останніх до висихання та дії ультрафіолетового випромінювання. Повітря являє собою середовище з ще більшими, ніж у воді, можливостями щодо переміщення мікроорганізмів.

### *Водна мікробіологія*

У перші хвилини опади вимивають мікроорганізми, що містяться в пилю. Крім того, через фільтруючу дію ґрунту, низьку температуру і відсутність світла мікроорганізми не приживаються у ґрунтових водах за винятком підземних басейнів або тунелів. Поверхневі води проходять через сільськогосподарські господарства та індустріальні райони, внаслідок чого вони насичені популяціями мікроорганізмів. У водному середовищі можуть утворюватися умови для росту мікроорганізмів. Так, розчинений кисень сприяє росту аеробних бактерій та найпростіших. Азот і фосфор разом зі світлом необхідні для водоростей.

Кількість та видовий склад мікроорганізмів є індикатором якості води. В чистій воді з малим містом поживних речовин кількість мікроорганізмів обмежена, але велике різноманіття їх видів. Збільшення поживних речовин призводить до відповідного зростання чисельності мікроорганізмів, але обмеження кількості видів. У забруднених анаеробних потоках можна виявити лише кілька видів бактерій.

Характерною ознакою водних середовищ є утворення кооперативних або конкурентних взаємодій між організмами:

*Водорості-бактерії* — водорості, що потребують  $CO_2$  і утворюють кисень, співіснують з бактеріями, яким потрібний кисень і які утворюють  $CO_2$ .

*Найпростіші-бактерії* — при обробці муніципальних вод бактерії перетворюють органічні відходи в стабільні продукти; найпростіші споживають бактерії і обме-

жують їх чисельність, внаслідок чого в мікрофлорі встановлюється динамічна рівновага.

*Бактерії-бактерії* — це співіснування кислотоутворюючих бактерій, що перетворюють органічну речовину в жир, з метаноутворюючими бактеріями, для діяльності яких потрібні кислоти.

### *Ґрунтова мікробіологія*

Бактерії й гриби посідають перші місця за чисельністю серед ґрунтових мікроорганізмів. Автотрофні та гетеротрофні бактерії руйнують складні органічні і неорганічні субстанції. Гриби розкладають целюлозу й основні компоненти рослинних тканин. Розташовані вони поблизу зеленої поверхні, де забезпечуються аеробні умови.

Водорості не відіграють такої важливої ролі як бактерії і гриби у родючому ґрунті; але в неорганічних ґрунтах вони є первинними продуктами органічного матеріалу.

Найпростіших також багато там, де є бактерії та складаються аеробні умови.

### *Вплив мікроорганізмів на навколишнє середовище*

Активність мікроорганізмів дає змогу дуже ефективно руйнувати тверді муніципальні відходи, що містять багато органічних речовин. Будучи у ґрунті, вони потрапляють спочатку в аеробні, пізніше — в анаеробні умови. Результатом цієї активності є розкладання складних органічних речовин на прості складні кислоти, що завдяки окисленню грибами та аеробними бактеріями перетворюються на багатий на поживні речовини гумус (компост). Подальше перебування компосту при температурі 60 °C протягом трьох днів призводить до знищення патогенної мікрофлори. Серед основних руйнівників — такі бактерії як *Bacillus*, *Clostridium*, *Pseudomonas* та гриби *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus*.

### *Патогенні мікроорганізми*

*Патогенним* називають організм, що вносить інфекцію в організм хазяїна. Він діє як паразит, порушуючи



його нормальну фізіологічну активність. Наведемо короткий перелік патогенних мікроорганізмів та захворювань, що спричиняються ними:

*бактерії* — сибірка, ботулізм, бруцельоз, холера, чума, сальмонельоз, дизентерія, тиф;

*віруси* — інфекційний гепатит, жовта лихоманка;

*найпростіші* — амебозна дизентерія, малярія;

*гельмінти* — різноманітні гельмінтози.

Майже всі захворювання, що передаються через воду, кишкового походження. Фекальні маси від інфікованих носіїв можуть потрапляти у воду різноманітними шляхами — за викидів стічних вод, руйнування каналізаційних мереж тощо.

Патогенні організми не ростуть у воді, але можуть зберігатися в ній певний час.

Мікроорганізми, що поширюються через повітря, можуть сприяти таким респіраторним захворюванням як легеневий туберкульоз (бактерії), грип (віруси) та легеневий мікоз (гриби). Передаються патогенні мікроорганізми через кашель і чхання за утворення аерозолів та краплин.

#### *Атмосферні аерозолі біологічного походження*

До аерозолів біологічного походження слід віднести віруси, бактерії, пилок і частинки комах. Всі вони здатні провокувати захворювання та алергійні реакції людей, тварин і рослин. Крім того, ці аерозолі є центрами конденсації і, отже, впливатимуть на процеси утворення хмар. Основним джерелом біологічних аерозолів є рослини, що постачають в атмосферу спори і пилок. Останні поширюються завдяки повітряним потокам. Крім того — сільське господарство з його технологічними процесами з обробки землі, муніципальна активність та численні водойми. Розміри аерозолів біологічного походження варіюють у межах: віруси — 0,005-0,25 мкм; бактерії, спори — більше 0,5 мкм; пилок — більше 5 мкм; рештки рослин, частинки комах, епітелію людини і тварин — близько 1 мкм. Концентрація біологічних аерозолів залежить від конкретних умов; так, у зоні стічних вод концентрація

бактерій становить  $10^4$  -  $10^5$  см<sup>-3</sup>; в повітрі міста — 7500 см<sup>-3</sup>; в атмосфері парка — 290 см<sup>-3</sup>.

#### *Біомедичні відходи*

До цього типу відходів належать культури інфекційних агентів, патогенні покидьки, кров і кров'яні продукти, медичні інструменти, отруєні відходи тварин, ізоляційні матеріали, що залишилися від інфекційних хворих.

Продуцентами біомедичних відходів є шпиталі, клініки, медичні лабораторії, фармацевтичні заклади. Оцінки свідчать, що в середньому кількість відходів у лікарнях за добу варіює від 4,5 до 9,1 кг на ліжку; 10% цих відходів є небезпечними для здоров'я. Сюди можна додати залишки хімічних та хіміотерапевтичних препаратів. Значно зменшити ризик від біомедичних відходів можна за їх високотемпературної (980-1200 °C) обробки.

## ОСНОВИ СПЕКТРОСКОПІЇ

### Спектри атомів і молекул

#### Спектри атомів

У 1913 р. датський фізик Н. Бор дав пояснення стійкості атомів та спектральних закономірностей, що одержали назву *постулатів Бора*. Згідно з ними існують стаціонарні стани атома, що відповідають дискретному ряду дозволених значень енергії  $E_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ ). Зміна енергії пов'язана із стрибкоподібним (квантовим) переходом з одного стаціонарного стану в інший; умова частот електромагнітного випромінювання під час переходу атому із стану з енергією  $E_i$  в стан з енергією  $E_j$  має вигляд:

$$E_i - E_j = h\nu, \quad (4.1)$$

де  $h$  — стала Планка  $\nu$  — частота випромінювання.

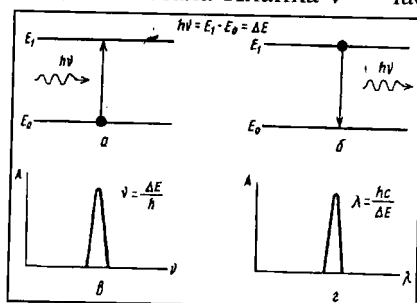


Рис. 4.1. Енергетичні рівні атома: а — поглинання кванта світла; б — випромінювання кванта світла; в — спектральна лінія поглинання (або випромінювання) в масштабі частоти; г — те саме в масштабі довжини хвиль

Звичайно атоми залишаються в *основному стані*  $E_0$  з мінімальною енергією; стани з більшою енергією називають *збудженими*. Графічно їх зображують енергетичними рівнями (рис. 4.1). Перехід із рівня  $E_0$  на рівень  $E_1$  відповідає поглинанню кванта світла  $h\nu$  (рис. 4.1а); при переході з рівня  $E_1$  на рівень  $E_0$  відбувається випромінювання кванта світла

$h\nu$  (рис. 4.1б). Переходи супроводжуються різкою зміною поглинання (або випромінювання) під час зміни частоти (рис. 4.1в) або довжини хвилі (рис. 4.1г), тобто характеризуються появою вузьких спектральних ліній поглинання (або випромінювання).

#### Спектри молекул

Спектри молекул мають трохи складнішу структуру, ніж спектри атомів. Це пов'язано насамперед з участю молекули як динамічної системи (що складається з атомів) у трьох видах рухів: *електронному* (рух електронів навколо ядер), *коливальному* (коливання ядер навколо положень рівноваги) та *обертальному* (обертання молекул як цілого у просторі). Таким чином, енергія молекули може бути подана як:

$$E = E_{\text{ел}} + E_{\text{кол}} + E_{\text{об}}. \quad (4.2)$$

Відповідно до постулатів Бора, молекула може перебувати в певних енергетичних станах. Повна енергія  $E$  молекули має дискретні значення, що характеризуються набором електронних коливальних та обертальних рівнів. Переходи із цих рівнів супроводжуються утворенням електронно-коливально-обертальних спектрів. Причому суто електронні спектри розміщені в ультрафіолетовій та видимій ділянках спектра, коливальні — в інфрачервоній, обертальні — в далекій інфрачервоній та надвисокочастотній ділянках спектра. Енергетичну діаграму молекули наведено на рис. 4.2. Природно, що й спектри молекул мають складніший характер, пов'язаний з набором окремих, просторово незв'язаних спектральних ліній.

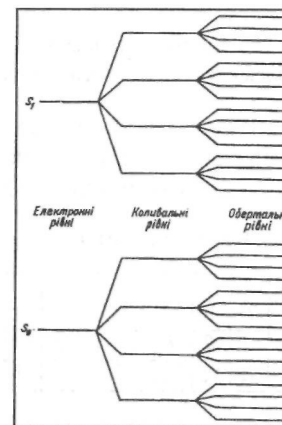


Рис. 4.2. Енергетична діаграма молекули

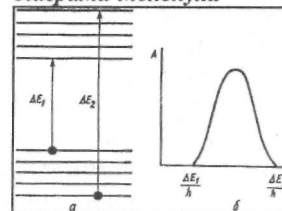


Рис. 4.3. Енергетичні рівні молекули (а) та смуга поглинання (б)

Саме тому спектри поглинання молекул характеризуються широкими смугами (рис. 4.3). Щодо процесів випромінювання слід зазначити, що після поглинання

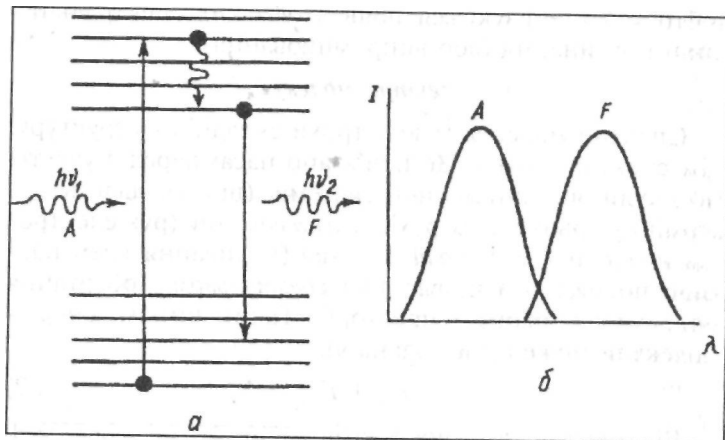


Рис. 4.4 Процеси поглинання і випромінювання кванта світла молекулою (а); смуги поглинання А та випромінювання F (б)

кванта світла та переходу молекули у збуджений стан вона бере участь у переходах між підрівнями (рис. 4.4). Через це пік поглинання завжди розміщений в ділянці

#### 4.1. Квантові числа

$n$	$l$	2					3								
$l$	0	0	1			0	1			2					
$m_l$	0	0	1	0	-1	0	1	0	-1	2	1	0	-1	-2	
$m_s$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	

вищих частот (або коротких довжин хвиль), ніж пік випромінювання. Крім того, кожний електрон у молекулі бере участь не тільки в орбітальному русі, але й в обертанні навколо власної осі, приймаючи дискретні значення енергії. Важливою характеристикою електрона є *спін* — власний момент кількості руху електрона, що може сумуватися з обертальним моментом кількості руху або відніматися від нього. Згідно з *принципом Паулі*, в одному енергетичному стані не може бути більше двох електронів, причому один з них має позитивний, а інший — негативний спін (табл. 4.1). Якщо

під час збудження електрона його спін не змінюється, такі енергетичні рівні називають *синглетними* ( $S_1$ ,  $S_2$  тощо). Якщо спін змінюється, рівні називають *триплетними* ( $T_1$ ,  $T_2$  і т.д.). Таким чином, з урахуванням сумарного спіну збуджених електронів енергетична діаграма буде характеризуватися набором синглетних і триплетних рівнів (рис. 4.5).

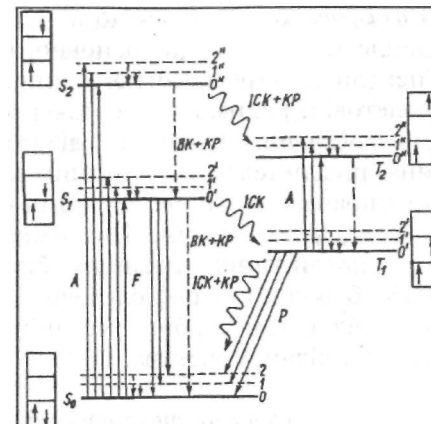


Рис. 4.5. Схема енергетичних рівнів та можливих переходів між ними (пояснення в тексті)

#### Процеси дезактивації

Після збудження молекули через поглинання кванта світла вона бере участь у переході до основного стану завдяки випромінювальним та безвипромінювальним процесам. До основних безвипромінювальних процесів можна віднести:

1. *Коливальну релаксацію (КР)*, що триває  $10^{-14} \div 10^{-12}$  с і супроводжує перехід молекули в основний коливальний стан електронного збудженого стану з випромінюванням інфрачервоного кванта світла або із перенесенням енергії через зіткнення;

2. *Внутрішню конверсію (ВК)*, яка триває  $10^{-12}$  с та відбувається між електронними станами внаслідок перекривання нижніх коливальних рівнів вищого електронного стану вищими коливальними рівнями нижнього електронного стану;

3. *Інтерсистемну конверсію (ІСК)*, що буває, наприклад, між синглетними і триплетними рівнями.

До випромінювальних процесів слід віднести *флуоресценцію F*, що супроводжує перехід із збудженого синглетного стану до основного (наприклад,  $S_1 \rightarrow S_0$ ),

та *фосфоресценцію*  $P$ , якщо існує перехід із збудженого триплетного стану до основного (наприклад,  $T_1 \rightarrow S_0$ ). Спектри електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній ділянках називають *оптичними*. Оптичний діапазон займає лише частину шкали електромагнітних хвиль. Проте ефекти, які справляє оптичне випромінювання на біологічні об'єкти, досить значні. Це можна пояснити наявністю смуг поглинання важливих біологічних молекул — ДНК, білків в ультрафіолетовій ділянці; хлорофілу, каротиноїдів, гемоглобіну, меланінів, родопсину тощо у видимій ділянці спектра.

### Основні спектроскопічні терміни

Оптичне випромінювання, що потрапляє на об'єкт, взаємодіє з ним і бере участь у певних процесах. Якщо світловий потік зазнає змін під час проходження об'єкта, йдеться про *пропускання*. Цей параметр залежить від розміру, форми та стану поверхні об'єкта, а також від кута падіння, спектрального складу і поляризації випромінювання. Зменшення світлового потоку, що проходить через середовище із речовиною, характеризується процесом *поглинання*.

Процес, за якого під час падіння оптичного випромінювання з одного середовища на межу поділу з іншим середовищем взаємодія світла з речовиною призводить до появи світлової хвилі, що поширюється від межі поділу назад, у попереднє середовище, називається *відбиванням*. Розрізняють *дзеркальне* відбивання (коли нерівності поверхні на межі поділу малі порівняно із довжиною хвилі  $\lambda$  випромінювання, що падає) та *дифузне* (коли розміри пропорційні з  $\lambda$ ). Дзеркальне відбивання залежить від кута падіння світла, поляризації, показника заломлення першого і другого середовищ. Дифузне відбивання визначається співвідношенням між  $\lambda$  та нерівностями поверхні, умовами освітлення, властивостями середовища, що відбиває світло.

Під час взаємодії оптичного випромінювання із середовищем внутрішня структура якого неоднорідна, відбувається *розсіювання* випромінювання. Цей процес

супроводжується поширенням частини випромінювання в напрямку, що відрізняється від напрямку поширення випромінювання, що падає. Якщо частота розсіяного випромінювання дорівнює частоті того, що падає, таке розсіювання називається *релеєвським*: якщо частота змінюється при розсіюванні, його називають *комбінаційним* (або *раманівським*). Характер розсіювання оптичного випромінювання залежить від співвідношення між розмірами частинок середовища, що розсіюють, та довжиною світлової хвилі  $\lambda$  (табл. 4.2).

4.2. Співвідношення між розмірами частинок середовища, які розсіюють, відносним показником заломлення та довжиною світлової хвилі

Тип розсіювання	Вимоги до показника заломлення	Вимоги до розмірів
Релея	$  (n - 1)   \ll 1$	$d < 0,05 \lambda$
Дебая	$  (n - 1)   \approx 0,1$	$0,05 \lambda < d < \lambda$
Мі	$(n - 1) > 0$	$d > \lambda$

Випромінювання, що є надлишком над тепловим випромінюванням тіла і те, що триває протягом тривалішого часу, ніж період світлових коливань, називають *люмінесценцією* (або *перевипромінюванням*). Люмінесценція відрізняється від різних видів розсіювання тим, що між поглинанням і випромінюванням світла відбуваються проміжні процеси, триваліші за період світлової хвилі. Розрізняють швидко загасаючу (*флуоресценцію*) і тривалу (*фосфоресценцію*) люмінесценцію. Грубо (якщо не враховувати розсіювання та перевипромінювання) процес взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом можна виразити так:

$$P_0 = P_{np} + P_{mc} + P_{от} \quad (4.3)$$

де  $P_0$  — потужність випромінювання, що падає на об'єкт;  $P_{np}$ ,  $P_{mc}$  і  $P_{от}$  — частини потужності, що пройшла крізь об'єкт, поглинута або відбита ним відповідно.

Частота  $\nu$  і довжина світлової хвилі  $\lambda$  пов'язані співвідношенням:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (4.4)$$

де  $c$  — швидкість світла.

Хвильове число  $\sigma$  пов'язане з частотою  $\nu$  і довжиною світлової хвилі  $\lambda$  співвідношеннями:

$$\sigma = \frac{\nu}{c}, \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.6)$$

Одиниці вимірювання хвильового числа і довжини світлової хвилі пов'язані рівнянням:

$$\sigma (\text{см}^{-1}) = \frac{10^4}{\lambda (\text{мкм})}. \quad (4.7)$$

Енергія одного кванта (фотона) визначається як:

$$E = h\nu = hc/\lambda. \quad (4.8)$$

Процес взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом характеризується такими термінами:

Коефіцієнт пропускання  $\tau$ :

$$\tau = \frac{P_{\text{пр}}}{P_o}, \quad (4.9)$$

де  $P_{\text{пр}}$  — потужність випромінювання, що пропускається об'єктом у напрямку поширення випромінювання;  $P_o$  — потужність випромінювання, що потрапляє на об'єкт.

Коефіцієнт поглинання  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{P_{\text{полл}}}{P_o}, \quad (4.10)$$

де  $P_{\text{полл}}$  — потужність випромінювання, що поглинається об'єктом.

Коефіцієнт відбивання  $\rho$ :

$$\rho = \frac{P_{\text{відб}}}{P_o}, \quad (4.11)$$

де  $P_{\text{відб}}$  — потужність випромінювання, що відбивається об'єктом.

Залежності цих коефіцієнтів від довжини світлової хвилі  $\lambda$ , а саме  $\tau(\lambda)$ ,  $\alpha(\lambda)$  і  $\rho(\lambda)$  називаються *спектрами пропускання, поглинання і відбивання* відповідно.

Оптична густина  $D$ :

$$D = -\ln \tau. \quad (4.12)$$

Поглинання  $A$ :

$$A = -\lg(1 - \alpha) = -\lg \tau. \quad (4.13)$$

На відміну від оптичної густини  $D$ , що визначається і поглинанням, і розсіюванням, поглинання  $A$  зв'язане тільки з поглинанням випромінювання всередині об'єкта.

При використанні натурального логарифма поглинання визначається як:

$$B = -\ln \tau. \quad (4.14)$$

Молярний коефіцієнт поглинання  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{A}{Cl}, \quad (4.15)$$

де  $C$  — концентрація компоненти об'єкта в молях;  $l$  — довжина шляху, пройденого всередині однорідного об'єкта.

Аналог, отриманий при використанні натурального логарифма, має вигляд:

$$k = \frac{B}{Cl}. \quad (4.16)$$

Одиниці вимірювання величин  $\epsilon$  і  $k$  —  $\text{м}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$ . Крім того, можуть використовуватися позасистемні

одиниці:  $\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  або  $\text{дм}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . У цьому випадку  $\epsilon$  (або  $k$ ) називають *коефіцієнтом екстинкції*.

Коефіцієнт пропускання і молярний коефіцієнт поглинання пов'язані законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$\tau = e^{-\alpha l} = e^{-kCl} \quad (4.17)$$

Потужність флуоресценції визначається як:

$$P_{\text{фл}} = P_0(1 - \tau)\varphi, \quad (4.18)$$

де  $\varphi$  — квантовий вихід флуоресценції (відношення кількості квантів, що випромінюються, до кількості поглинутих квантів).

Для розведених розчинів ( $\epsilon Cl \leq 0,05$  або  $kCl \leq 0,05$ ) маємо такі рівняння:

$$P_{\text{фл}} = K\varphi P_0 \epsilon Cl, \quad (4.19)$$

$$P_{\text{фл}} = K'\varphi P_0 kCl, \quad (4.20)$$

де  $K$  і  $K'$  — числові коефіцієнти.

### Спектроскопічні методи

Галузь фізики та техніки, що вивчає спектри електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному діапазонах, називають *оптичною спектроскопією*. Завданням спектроскопії є дослідження властивостей та структури речовин на основі вивчення особливостей її спектрів. Методи кількісного та якісного визначення складу речовини, що ґрунтуються на одержанні і дослідженні її спектрів, становлять суть *спектрального аналізу*. Нижче наведено основні методи оптичної спектроскопії, що можуть бути використані під час контролю навколишнього середовища.

**Емісійна спектроскопія.** Вивчення спектрів випромінювання атомів, молекул та іонів, збуджених різноманітними джерелами електромагнітного випромінювання, для якісного та кількісного визначення складу ре-

човини становить суть емісійної спектроскопії. Методи емісійної спектроскопії ґрунтуються на вивченні структури та властивостей квантових систем відповідно до їх спектрів випромінювання. При цьому досліджувана речовина, в яку надходить аерозоль із розчину з окислювачем та паливним газом, збуджується полум'ям пального (або дугою, іскрою, плазмою). Під впливом високої температури починається іонізація речовини і випромінювання її атомами світла певної довжини хвилі. Метод можна застосовувати для визначення лужних та лужноземельних елементів, лантанидів, деяких перехідних елементів, металоорганічних сполук. Недоліком методу є необхідність підтримання постійної температури, мала концентрація атомів; деяка частина енергії збуджених атомів віддається через непружні зіткнення навколишніх частинок, що є причиною порушення лінійної залежності інтенсивності випромінювання від концентрації атомів. Крім того, емісійні спектри багатолінійчасті, тому є небезпека накладання ліній окремих атомів. Принцип реалізації атомно-емісійної спектроскопії показано на рис. 4.6.

**Абсорбційна спектроскопія.**

Атомно-абсорбційний аналіз полягає у випаровуванні речовини, що досліджують (у полум'ї графітової трубки, плазмі високочастотного розряду) і пропусканні піс-

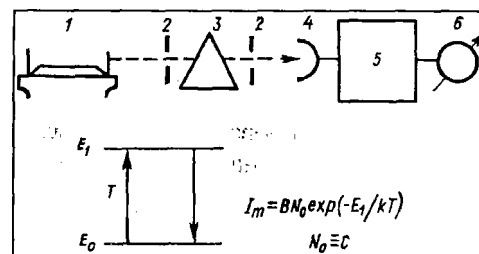


Рис. 4.6. Схема атомно-емісійного спектрометра: 1 — джерело полум'я, 2 — діафрагма, 3 — призма, 4 — фотоприймач, 5 — система реєстрації, 6 — вимірювальний прилад

ля цього через пару речовини оптичного випромінювання. Реєстрація ступеня ослаблення інтенсивностей ліній елемента, які визначають, дає можливість оцінювати концентрацію його у зразку. Типову схему атомно-абсорбційного спектрометра наведено на рис. 4.7. Випромінювання лампи 1 (з порожнистим катодом або кулястої), що з'єднана з джерелом живлення 2, прохо-

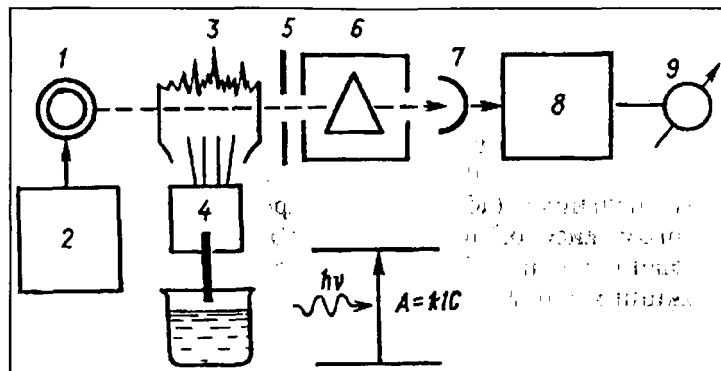


Рис. 4.7. Схема атомно-абсорбційного спектрометра (пояснення в тексті)

дить через полум'я пальника 3, в якому спостерігається випаровування розчину 3 за допомогою розпилювача 4. При цьому разом із розчином подається паливний газ та окислювач. Зразок плавиться і випаровується, під впливом високої температури відбувається дисоціація молекул, що супроводжується утворенням вільних атомів. Оптичне випромінювання, що поглинається цими атомами, проходить через діафрагму 5 і монохроматор 6, після чого реєструється фотоприймачем 7. Електричний сигнал з виходу фотоприймача подається на посилювач 8 та реєструється індикатором 9. Атомно-абсорбційна спектрометрія ґрунтується на врахуванні закону Ламберта-Бугера-Бера; очевидно, що між поглинанням і концентрацією існує лінійна залежність. Порівняно з фотометричним методом, де максимальне значення молярного коефіцієнта поглинання дорівнює  $\epsilon = 10^5$ , чутливість атомно-абсорбційного методу значно більша ( $\epsilon = 10^7 + 10^9$ ). Під час атомізації зразка використовують температури  $-2000 + 3000$  °C, у результаті чого близько 90 % атомів перебуває у незбудженому стані; решта компонентів атомізованого зразка не впливає на величину атомного поглинання. Саме цим зумовлена висока селективність методу. Недоліком методу є малий час перебування атомів у полум'ї, вплив в'язкості, поверхневого натягу і хімічних процесів на результати вимірювань, необхідність підготовки зразків з метою видобування елементів. Метод

атомно-абсорбційної спектроскопії є перспективним з точки зору дослідження об'єктів навколишнього середовища, зокрема атмосфери, ґрунтів, водойм. На сьогодні метод дає змогу визначити близько 70 різних хімічних елементів і токсичних металів.

**Колориметричні методи.** Зазначені методи ґрунтуються на вимірюванні ослаблення світлового потоку за поглинання світла досліджуваною речовиною. Інгредієнт, який визначають, забарвлюють за допомогою специфічної хімічної реакції. Прилади, використовувані в колориметрії, здійснюють або візуальне порівняння забарвлення робочого та стандартного розчинів (колориметри), або визначають абсолютні чи відносні інтенсивності світлових потоків, що проходять крізь розчин (фотометри). Як приклад реалізації колориметричного методу можна навести можливість визначення атмосферних забруднень. Метод можна застосовувати для виявлення й оцінки озону, аміаку, залишкового хлору, поверхнево-активних речовин у воді, органічних домішок у ґрунті. До переваг спектрофотометричних методів можна віднести їхню простоту та дешеве обладнання; недоліком є значна тривалість процесу вимірювань.

**Інфрачервона спектроскопія.** Якщо молекула перебуває в основному електронному стані і цей стан не змінюється, то частота поглинутого світла визначається співвідношенням:

$$V_{\text{кол}} = \frac{E_{\text{кол}}^I - E_{\text{кол}}^{II}}{h} + \frac{E_{\text{об}}^I - E_{\text{об}}^{II}}{h}. \quad (4.21)$$

Коливальні рівні енергії та частоти квантових переходів знаходять через коливальні координати, кількість яких для  $N$ -атомної молекули становить  $n = 3N - 6$ . У вигляді таких коливальних координат використовують зміни величин, що характеризують відносно розміщення атомів у молекулі: зміну довжин зв'язків, кутів між зв'язками, відстані між незв'язаними атомами. У цілому коливальні координати молекул залежать від будови останньої та типу симетрії. Саме частоти власних коли-

вань таких молекул як  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  та ін. проявляються у спектрах інфрачервоного поглинання.

**Оптико-акустична спектроскопія.** Під час проходження оптичного випромінювання крізь досліджуваний об'єкт відбувається поглинання кванта світла молекулами цього об'єкта, їх збудження та перехід на високоенергетичний рівень. Збуджені молекули, що повертаються в основний стан, віддають залишок енергії у вигляді тепла середовищу, яке оточує об'єкт. У замкнутому об'ємі утворюється підвищений тиск. Коливання тиску при використанні модульованого оптичного випромінювання сприймаються як акустичні сигнали, що реєструються. Блок-схема оптико-акустичного спектрометра наведено на рис. 4.8. Перевагою методу

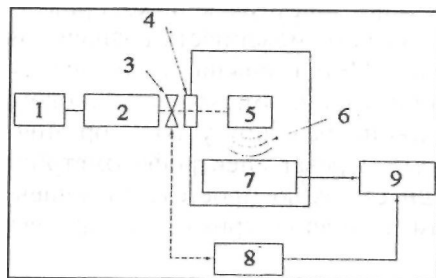


Рис. 4.8. Схема фотоакустичного спектрометра: 1 — джерело випромінювання; 2 — монохроматор; 3 — модулятор; 4 — вікно; 5 — зразок; 6 — акустичний перетворювач і підсилювач; 7 — контроль модулятора; 8 — система обробки і реєстрації сигналу

залежність чутливості методу від тиску досліджуваного газу, складну процедуру калібрування спектрів, великі (більше 10 %) похибки вимірювань коефіцієнта поглинання.

є пропорційність оптико-акустичного сигналу коефіцієнта поглинання і відсутність залежності цього сигналу від розмірів зразка, що зручно для локальних вимірювань і не потребує довгих трас. Чутливість методу досягає  $10^{-7} \div 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ . До недоліків методу можна віднести вплив вібрацій та акустичних шумів,

**Спектроскопія на основі Фур'є-перетворення.** Розглянемо інтерферометр Майкельсона (рис. 4.9), в якому використовується джерело монохроматичного оптичного випромінювання. Одне з дзеркал інтерферометра може рухатися поступально. Якщо це дзеркало переміщується на відстань, що дорівнює  $\lambda/4$  (де  $\lambda$  — довжина хвилі оптичного випромінювання), то два промені

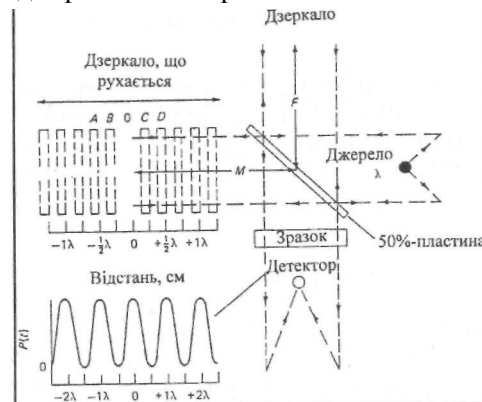


Рис. 4.9. Інтерферометр Майкельсона перебуватимуть у протифазі, коли досягатимуть детектора. Під час руху дзеркала з постійною швидкістю детектор буде реєструвати модульований за синусоїдальним законом світловий сигнал. Традиційна спектроскопія оперує в частотному масштабі, тобто досліджує потужність оптичного випромінювання залежно від частоти (довжини хвилі); спектроскопія Фур'є перетворення використовує часовий масштаб, якщо реєструються зміни потужності оптичного випромінювання в часі. На рис. 4.10 наведено спектр монохроматичного випромінювання в часовому і частотному масштабах, а на рис. 4.11 — результат накладання двох монохроматичних коливань також у часовому і частотному масштабах. Внаслідок такого накладання виникають

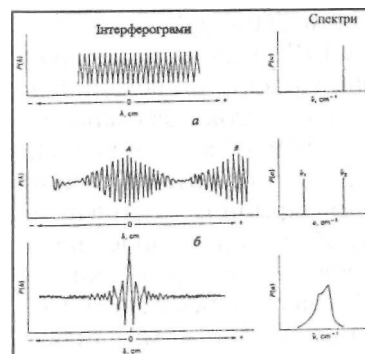


Рис. 4.10. Спектр оптичного биття коливань.

випромінювання в часовому і частотному масштабах

Якщо використовувати джерело немонохро-



матичного оптичного випромінювання, то завдяки Фур'є-перетворенню можна для будь-якого частотного

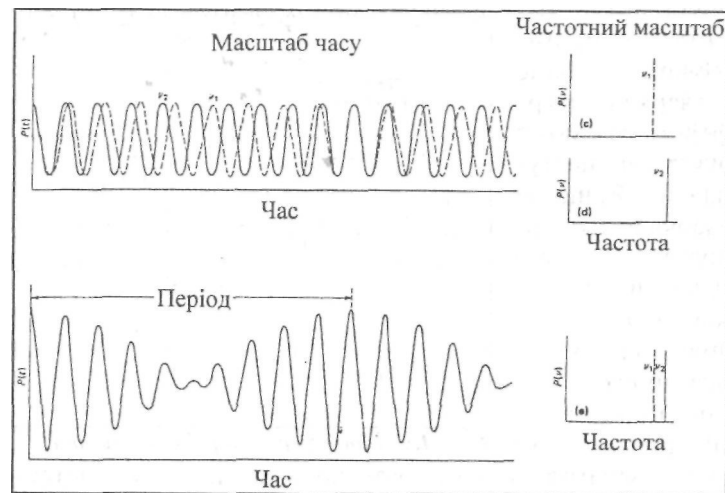


Рис. 4.11. Результат накладання двох монохроматичних коливань в часовому і частотному масштабах

спектра скласти специфічну інтерферограму — так званий *спектр Фур'є*. Методи спектроскопії Фур'є-перетворення характеризуються високим розділенням ( $< 0,1 \text{ см}^{-1}$ ), точністю і відтворюваністю.

**Спектроскопія відбивання у ближній інфрачервоній області спектра.** Ближня інфрачервона (БІЧ) область спектра обмежується діапазоном 760н-2500 нм. У процесі спектрального аналізу в БІЧ області визначають відношення відбитого від зразка випромінювання до випромінювання, що впало на зразок, залежно від довжини хвилі. Поглинання в БІЧ області зумовлене насамперед участю вищих гармонік (обертонів) основних коливань і комбінації цих гармонік з основними коливаннями. Виникненню обертонів сприяє наявність в атомних структурах характерних груп таких як -ОН, -СН, -NH, C=O, Н-О-Н тощо. Перевагою методу спектроскопії відбивання в БІЧ області є можливість роботи з високими концентраціями рідких зразків, а також із твердими (або сипкими) непрозорими матеріалами завдяки слабкому поглинанню в цій області спектра. Крім того, висока здатність об'єктів відбивати

хвилі в БІЧ області дає можливість робити кількісний і якісний аналіз досліджуваних об'єктів з високим ступенем селективності: цій обставині сприяє різноманітність обертонів і їх комбінацій, що формують специфічні спектри відбивання.

**Спектроскопія пружного розсіювання.** До цього типу розсіювання оптичного випромінювання можна віднести таке розсіювання, при якому частоти падаючого і розсіюваного випромінювань однакові. Є три типи пружного розсіювання.

**Розсіювання Релея** виникає за рахунок зміщення зв'язаних електронів під впливом електричного поля, що падає на молекулу. Це поле сприяє утворенню диполя, що коливається і посиляє електромагнітне випромінювання такої ж частоти. Розсіювання Релея характеризується тим, що інтенсивність розсіюваного випромінювання змінюється залежно від четвертого ступеня довжини світлової хвилі. Саме такою залежністю можна пояснити природний блакитний колір неба, що створюється завдяки відбиванню сонячного світла від частинок пилу і водяної пари, наявних в атмосфері. У видимій частині спектра є істотна залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від довжини хвилі; в області більше 1 мкм

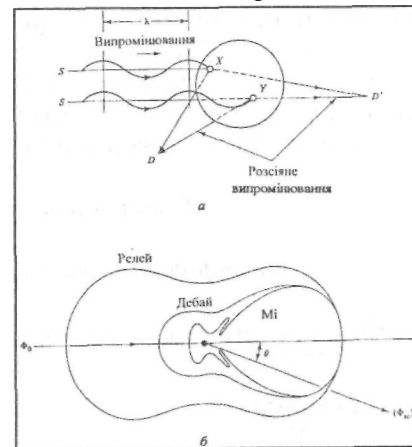


Рис. 4.12. Розсіювання оптичного випромінювання: а. Інтерференція під час розсіювання на частинці великого розміру; б. Кутівий розподіл інтенсивності випромінювання для трьох типів розсіювання (пояснення в тексті)

можна знехтувати.

**Розсіювання Мі** відбувається на частинках великих розмірів і супроводжується виникненням інтерференції світла, що призводить до появи інтерференційної

картини и істотної зміни діаграми кутового розподілу розсіяного світла.

*Розсіювання Дебая* відповідає проміжному випадку між двома попередніми типами розсіювання — Релея і Мі (рис. 4.12). Аналіз характеру розсіювання Дебая і Мі лежить в основі *нефелометрії* і *турбідиметрії* — техніки визначення розмірів частинок, суспендованих у рідині.

**Флуоресцентна спектроскопія.** Суть флуоресцентних методів полягає в опромінюванні досліджуваної речовини, збудженні молекули цієї речовини та перевипромінюванні світла у вигляді флуоресценції. Довжина хвилі випромінювання флуоресценції завжди перевищує довжину хвилі збудження. Реєстрація різноманітних параметрів флуоресценції (інтенсивності, спектрів випромінювання і збудження, часової кінетики, поляризації тощо) дає можливість одержати інформацію про речовину, що є об'єктом дослідження. Перевагами методів флуоресцентної спектроскопії є висока чутливість, малі (до  $10^{-12}$  г) кількості речовини, необхідної для дослідження, селективність та універсальність.

## Спектральні прилади

### Класифікація спектральних приладів

Основними компонентами спектрального приладу є

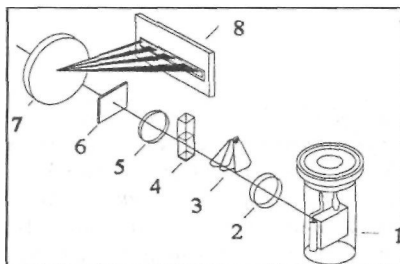


Рис. 4.13. Спектрометр з багатоканальною діодною лінійкою:  
1 — лампа; 2 — лінза; 3 — заслінка; 4 — кювета; 5 — лінза; 6 — щілина; 7 — дифракційна решітка; 8 — лінійка діодів

джерело оптичного випромінювання; кювета зі зразком, що досліджується; дисперсійний елемент (призма або дифракційна решітка); фотоприймач; система реєстрації.

Залежно від принципу роботи та призначення спектральні прилади поділяють на такі типи:

**Спектрометр** — пристрій для вимірювання спектра, тобто функції розподілу енергії світлових потоків за довжинами хвиль випромінювання. Прилади цього типу обладнані фотоелектричною реєстрацією спектра і застосовуються для всіх можливих аналізів. Схему багатоканального спектрометра з діодною лінійкою наведено на рис. 4.13.

**Спектрофотометр** — прилад для порівняння потоку випромінювання, що вимірюється, з еталонним для безперервного чи дискретного ряду довжин хвиль випромінювання. Ці прилади використовують також для визначення концентрації елементів і речовин у зразку шляхом порівняння інтенсивностей спектральних ліній або смуг поглинання чи випромінювання. Схеми спектрофотометрів подано на рис. 4.14.

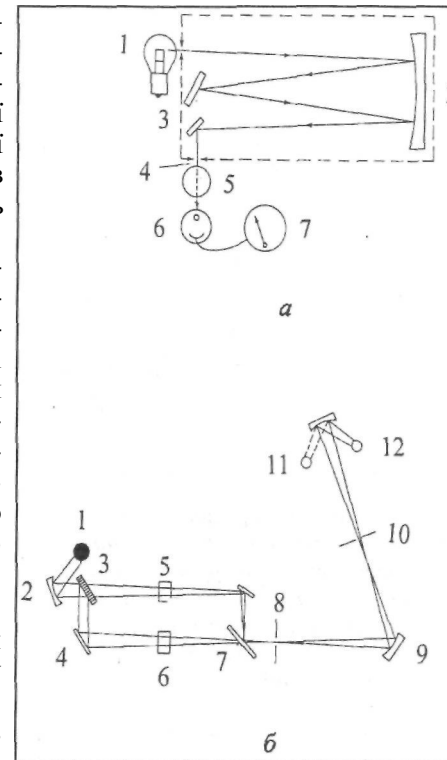


Рис. 4.14. а. Однопроменева схема спектрофотометра: 1 — джерело світла; 2 — дзеркало; 3 — дифракційна решітка; 4 — щілина; 5 — система регулювання щілиною; 6 — фотоприймач; 7 — вимірювальний прилад. б. Двопроменева схема спектрофотометра: 1 — фотопомножувач; 2 — сферичне дзеркало; 3 — дифракційна решітка; 4 — дзеркало; 5 — кювета з зразком; 6 — кювета з стандартним розчином; 7 — напівпрозора пластинка; 8 — щілина; 9 — дзеркало; 10 — щілина; 11 — вольфрамова лампа; 12 — дейтерієва лампа

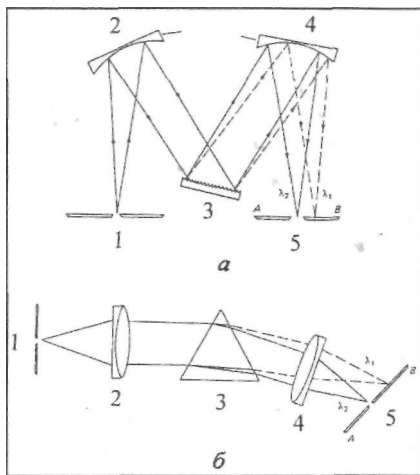


Рис. 4.15. а. Монохроматор з дифракційною решіткою: 1 — щілина; 2 — дзеркало; 3 — дифракційна решітка; 4 — дзеркало; 5 — щілина, б. Монохроматор з призмою: 1 — щілина; 2 — лінза; 3 — призма; 4 — лінза; 5 — щілина

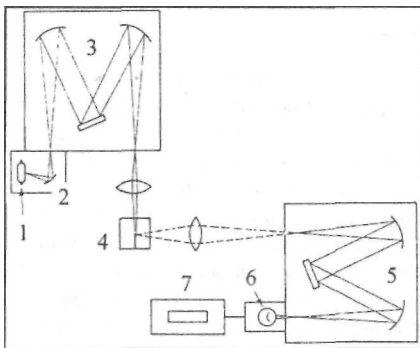


Рис. 4.16. Схема типового спектрофлуориметра: 1 — джерело світла; 2 — дзеркало; 3 — монохроматор; 4 — кювета; 5 — монохроматор; 6 — фотоприймач; 7 — система реєстрації

**Спектрограф** — прилад, в якому приймач реєструє випромінювання практично усього оптичного спектра, розгорнутого у фокальній площині оптичної системи. Для сприймання випромінювання використовують фотоматеріали, багатоелементні фотоприймачі, електронно-оптичні перетворювачі.

**Монохроматор** — прилад для виділення вузьких ділянок спектра оптичного випромінювання. Основні типи монохроматорів зображено на рис. 4.15.

**Флуориметр** — прилад для вимірювання інтенсивності речовини, що флуоресцює.

**Спектрофлуориметр** — прилад для вимірювання спектрів збудження та випромінювання флуоресценції речовини. Схему типового спектрофлуориметра подано на рис. 4.16.

## Принципи дії спектральних приладів

Залежно від з'єднання функціональних елементів розрізняють одно- та двопроменеві схеми спектральних приладів. В однопроменевій схемі, що реалізується у спектрометрах, всі елементи з'єднуються послідовно (рис. 4.14б). У двопроменевій схемі, застосовуваній у спектрофотометрах, випромінювання джерела ділиться на два потоки — основний та еталонний. Якщо ці потоки дорівнюють один одному, то система перебуває в рівновазі. Із зміною довжини хвилі під час сканування пропускання зразка змінюється і рівновага порушується; сигнал розбалансування посилюється та реєструється (рис. 4.14б).

Залежно від дисперсійного елемента розрізняють такі спектральні прилади: з призмою та дифракційною решіткою. Схему приладу першого типу наведено на рис. 4.15а. Оптичне випромінювання джерела проходить крізь вхідну щілину приладу, де формується зображення джерела. Світло, що виходить із щілини, проходить крізь колімуючу призму; заломлені призмою промені світла збираються лінзою на площині спостереження. У приладах другого типу як диспергуючий елемент застосовують дифракційну решітку. Схему приладу наведено на рис. 4.14б. При тих самих розмірах диспергуючого елемента спектральне розділення дифракційної решітки вище, ніж у призми.

## ЛАЗЕР ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

### Принцип дії лазера

Пристрій, який генерує когерентні електромагнітні хвилі за рахунок стимульованого випромінювання світла активним середовищем, що міститься в оптичному резонаторі, називається *лазером*. Принцип дії лазера пояснюється англійською фразою "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"; LASER, таким чином, є аббревіатурою словосполучення англійською мовою, що означає «посилення світла через стимульоване випромінювання».

### Стимульоване випромінювання

Стимульоване випромінювання відбувається тоді, коли квант світла (фотон) взаємодіє з атомом, що пере-

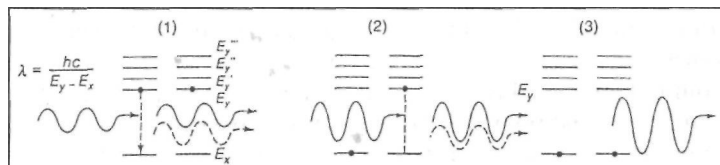


Рис. 4.17. Стимульоване випромінювання і підсилення світла

буває в збудженому стані. Причому частота фотона дорівнює частоті переходу атома із основного у збуджений стан. Під впливом фотона збуджений атом стимулює випромінювання власного фотона (рис. 4.17); результатом такого стимульованого випромінювання є збільшення кількості фотонів, тобто посилення світла.

### Інверсія населеності

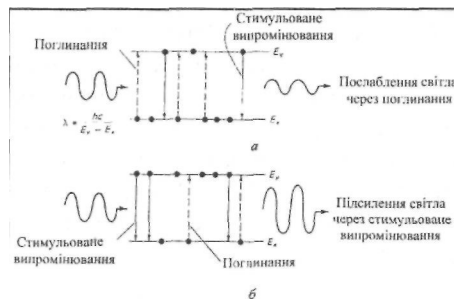


Рис. 4.18. Взаємодія фотона з: а. Неінвертованою системою; б. Інвертованою системою

Для того, щоб випромінювання мало перевагу над поглинанням, треба забезпечити так звану *інверсію населеності* — збільшення кількості збуджених атомів порівняно з тими, що перебувають в основному стані. Для реалізації інверсії населеності здійснюють *оптичну накачку*. Якщо звичайно кількість атомів в основному стані перевищує кількість збуджених атомів (рис. 4.18а), то під впливом накачки ситуація змінюється (рис. 4.18б).

### Будова лазера

Лазер складається з трьох основних компонентів — активного середовища, системи накачки та оптичного резонатора (рис. 4.19). *Активним середовищем* можуть

бути кристалічні або склоподібні матеріали, рідинні середовища, гази чи суміші газів, напівпровідники. *Джерелом оптичної накачки* можуть бути потоки сфокусованого світла, електричні розряди, пучки електронів тощо. *Оптичний резонатор* — це пристрій, в якому можуть збуджуватися стоячі або бігучі електромагнітні хвилі оптичного діапазону. Складається оптичний резонатор, як правило, з двох дзеркал.

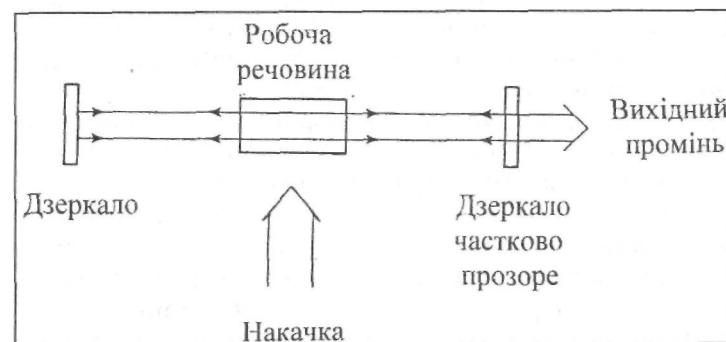


Рис. 4.19. Будова лазера (пояснення в тексті)

Після того, як у результаті накачки в активному середовищі реалізується інверсія населеності, збуджені атоми переходять в основний стан, що супроводжується випромінюванням фотонів. Фотони, що поширюються паралельно поздовжній осі оптичного резонатора, багаторазово відбиваються від дзеркал; при проходженні крізь активне середовище вони стають джерелом стимульованого випромінювання. Фотони, що поширюються під кутом до осі оптичного резонатора, залишають його. Багаторазові акти стимульованого випромінювання сприяють генерації оптичного випромінювання, що виходить крізь одне із дзеркал (напівпрозоре) резонатора.

Довжина хвилі лазерного випромінювання визначається структурою енергетичних рівнів активного середовища лазера та наявністю серед них довгоіснуючих рівнів.

### *Основні параметри лазерного випромінювання*

*Інтенсивність випромінювання* — повний потік енергії випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу у напрямку нормалі до неї і розрахований на одиницю тілесного кута.

*Монохроматичність* — здатність лазера випромінювати на одній певній і постійній частоті. Висока монохроматичність лазерного випромінювання створює умови, особливі для його проходження в атмосфері.

*Спрямованість* лазерного випромінювання, характеризується поширенням його у межах тілесного кута — кута розбіжності. Висока просторова спрямованість лазерного випромінювання дає змогу здійснювати дистанційні вимірювання трас будь-якої довжини.

*Висока стабільність частоти.* Сучасні лазери можуть мати стабільність частоти орієнтовно  $10^{-13}$  /  $10^{-14}$ , що дуже важливо для спектроскопічних досліджень.

*Імпульсний режим роботи.* Лазери останніх поколінь здатні генерувати ультракороткі імпульси, тривалість яких досягає сотень фемтосекунд. За допомогою таких приладів можна досліджувати нетривалі процеси.

*Плавне перестроювання частоти.* Деякі типи лазерів мають можливість плавно перестроювати частоту у широкому спектральному діапазоні. Серед лазерів, частота яких плавно перестроюється, слід виділити лазери з перевертанням спіну, параметричний генератор світла, хвильоводний лазер високого тиску, лазери на барвниках, напівпровідникові лазери, ексімерні лазери. Розробка лазерів з частотою, що перестроюється, та розширення діапазону частот, який перекривається лазерами, є одним з найважливіших завдань сучасної спектроскопії.

### **СПЕКТРОСКОПІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РОСЛИН І РОСЛИННИХ ПОКРИВІВ**

*Рослинний покрив* — це комплексне поняття, що включає в себе ґрунт у сукупності з рослинним угрупованням та приповерхневим шаром атмосфери. Контроль за ста-

ном такого поля потребує розробки нових, сучасних методів моніторингу, які б давали точну та вичерпну інформацію щодо всіх етапів розвитку рослин та впливу на них різноманітних природних і антропогенних факторів. Перспективними, з точки зору реалізації таких завдань, є методи оптичної та лазерної спектроскопії, що ґрунтуються на взаємодії оптичного випромінювання з речовиною. Реєстрацію залежності змін, яких набуває це випромінювання, від довжини світлової хвилі, покладено в основу оптичної спектроскопії. Особливий розвиток методи оптичної спектроскопії одержали після розробки та впровадження універсального приладу — лазера, здатного генерувати високоінтенсивне, монохроматичне та когерентне випромінювання. В цілому методи оптичної та лазерної спектроскопії характеризуються високою точністю, чутливістю та неруйнівною дією.

Розглянемо основні принципи і можливі практичні застосування спектроскопічних засобів для лабораторного та польового моніторингу як окремих рослин, так і рослинних покривів у цілому.

### **Спектроскопія відбивання**

#### *Механізми відбивання*

Є кілька гіпотез щодо механізмів відбивання оптичного випромінювання від окремого листка: одна з них пояснює процес відбивання на основі повного внутрішнього відбиття від межі клітини з повітряним проміжком тканини мезофіла; інша ґрунтується на припущенні дифузного розсіювання світла на клітинних мікрофібрилах. Сучасні уявлення про механізми відбивання оптичного випромінювання від листка базуються на твердженні, що і дифузне, й дзеркальне відбиття мають місце; характер відбивання залежить від довжини світлової хвилі, кута падіння, структури поверхні листка, наявності листяних волосків, поверхневого воску, режиму живлення та впливу зовнішніх факторів.

#### *Методи спектроскопії відбивання*

Всі методи спектроскопії відбивання рослин можна поділити на лабораторні, методи ближнього

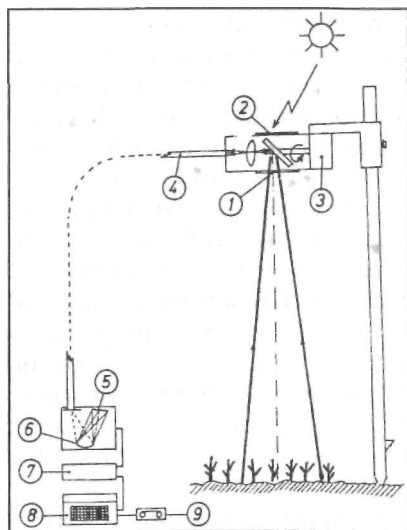


Рис. 4.20. Типовий прилад для вимірювання відбивальних характеристик рослинного покриву в режимі ближнього поля: 1 — вікно; 2 — екран; 3 — двигун; 4 — фільтр; 5 — CCD-система; 6 — дифракційна решітка; 7 — система обробки інформації; 8 — мінікомп'ютер; 9 — система реєстрації

#### Відбивальні вегетаційні індекси

Для встановлення функціональних зв'язків між вегетаційними характеристиками рослин, що перебувають у стресових умовах, і спектральними параметрами цих рослин доцільно вживати так звані *спектральні вегетаційні індекси*, що являють собою суму, різницю або відношення спектральних параметрів, визначених на певних аналітичних довжинах хвиль.

Розглянемо відбивальні вегетаційні індекси, використовувані під час спектроскопічного моніторингу рослин і рослинних покривів.

*Відносний вегетаційний індекс*,  $RVI$  - відношення відбивання рослинного покриву в ближній інфрачер-

вої області спектра ( $NIR$ ) до відбивання цього покриву в червоній області спектра ( $RED$ ):

Вивчати спектри відбивання листка в лабораторних умовах можна за допомогою комерційних спектрофотометрів, обладнаних інтегруючою сферою та пластинною  $BaSO_4$ , використовуюваною як стандарт.

Типовий прилад для вимірювання відбивальних характеристик рослинного покриву в режимі ближнього поля наведено на рис. 4.20.

вої області спектра ( $NIR$ ) до відбивання цього покриву в червоній області спектра ( $RED$ ):

$$RVI = NIR/RED. \quad (4.22)$$

Тут  $NIR$  відповідає області 750÷1359 нм і  $RED$  - 600÷700 нм.

*Нормалізований різницевий індекс*,  $NDVI$ , що визначається як:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED). \quad (4.23)$$

Перевагою цього індексу є близька до лінійної залежність його величини від кількості рослинної продукції.

*Перпендикулярний вегетаційний індекс*,  $PVI$ , який було запропоновано для запобігання впливу ґрунтового фону:

$$PVI = (aNIR - RED + b)/(1 + a^2)^{1/2}, \quad (4.24)$$

де  $a$  і  $b$  — константи.

Існують й інші спектральні індекси.

#### Відбивальні властивості окремого листка

*Відбивання  $r$*  визначається як відношення інтенсивності оптичного випромінювання  $I$ , що відбилося від даної поверхні ідеального розсіювача в даному напрямку, до інтенсивності випромінювання  $I_0$ , що падає на цю поверхню:

$$r = I/I_0. \quad (4.25)$$

Спектр відбивання, тобто залежність відбивання  $r$  зеленого листка від довжини світлової хвилі, подано на рис. 4.21. Він має три основних ділянки: 500÷750 нм, де поглинають рослинні пігменти, такі як хлорофіли  $a$  і  $b$ , каротини та ксантофіли; 0,75÷1,35 мкм, що характеризується високим рівнем відбивання за рахунок внутрішніх структур (зокрема, целюлози) листка;



Рис. 4.21. Спектр відбивання зеленого листка (пояснення в тексті)

550 нм у видимій області спектра, широкою смугою 0,75+1,35 мкм та максимумами відбивання при 1,65 та 2,20 мкм у ближній інфрачервоній області спектра.

#### Вплив різних факторів на відбивання листка

На відбивальні характеристики поодинокого листка

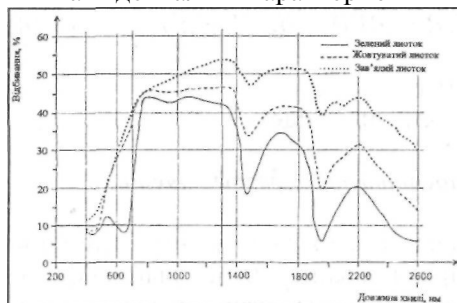


Рис. 4.22. Вплив процесу дегідратації на характер спектра відбивання листка пшениці

впливають такі фактори як рівень пігментації (високим концентраціям хлорофілу, наприклад, відповідають низькі значення коефіцієнта відбивання), положення листка на певному ярусі рослини (старіші за віком листки де-

монструють більше відбивання), бік листка (верхня частина листка містить більше хлорофілу, ніж нижня). Крім того, на відбивання листка впливають різноманітні стресові ситуації. Розглянемо деякі з них.

**Дегідратація (нестача води).** Максимуми відбивання листка при 1,65 і 2,20 мкм, пов'язані зі смугами поглинання води і обмежені мінімумами при 1,45 і 1,95 мкм, можуть бути використані для оцінки впливу вмісту води (рис. 4.22).

1,35+2,50 мкм — область, в якій відбувається інтенсивне поглинання води з максимумами при 1,45 та 1,95 мкм. Таким чином, спектр відбивання окремого листка відзначається максимумом відбивання при

**Температура.** Вплив температури можна оцінити за максимумами, що мають відношення до поглинання води в області від 1,35 до 2,50 мкм; крім того, смуги при 1,65 або 2,20 мкм можна використати для аналізу впливу низьких температур: замерзання листка призводить до порушення напівпровідності

міжклітинного простору рідиною, збільшення кількості розсіювання світла і зменшення відбивання.

**Сольовий режим.** В умовах соляного стресу відбувається пригнічення клітинного поділу, вповільнення швидкості росту клітин; саме через це листки демонструють більш компактну клітинну упаковку і відповідно — менше відбивання.

**Дефіцит поживних речовин.** Нестача азоту впливає на концентрацію пігментів та колір листка і, отже, на відбивання листка. Дефіцит заліза також впливає на відбивальні властивості листка; на рис. 4.23 наведено спектри відбивання нормального і вирощеного в умовах дефіциту заліза листків.

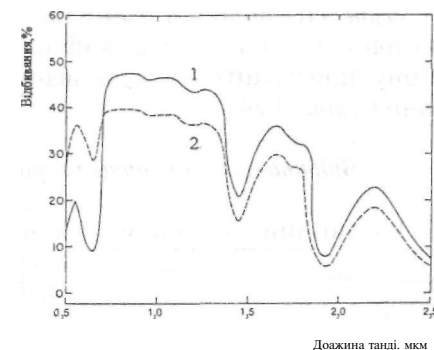


Рис. 4.23. Характер спектра відбивання зеленого листка в умовах: 1 — нормального постачання поживних речовин; 2 — дефіциту заліза

клітинних мембран, заповнення міжклітинного простору рідиною, збільшення кількості розсіювання світла і зменшення відбивання.

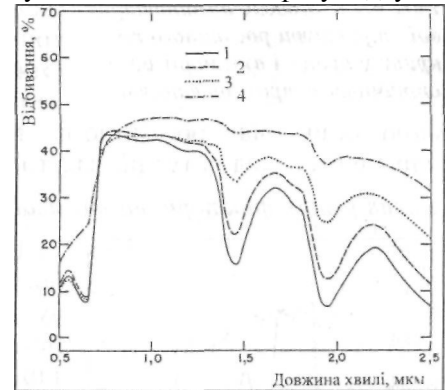


Рис. 4.24. Вплив озону на відбивальні характеристики зеленого листка: 1 — контроль; 2 — незначні пошкодження; 3 — серйозні пошкодження; 4 — дуже серйозні пошкодження листка, викликані озоном

**Озон.** Під впливом озону на листку виникають некротичні ділянки, позбавлені води. Інтенсифікація дії озону призводить до відповідного збільшення відбивання (рис. 4.24).

### Відбивальні властивості рослинного покриву

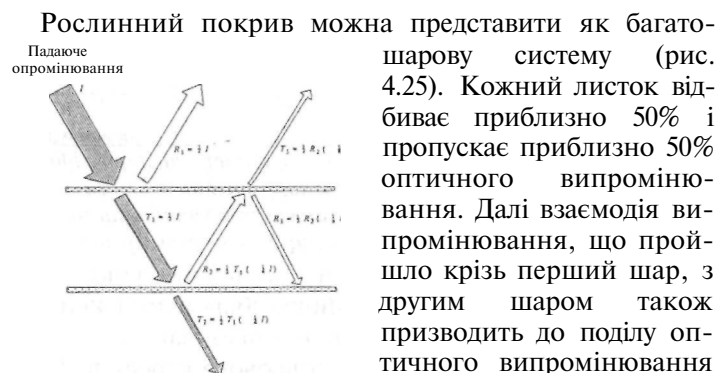


Рис. 4.25. Модель багатошарової структури рослинного покриву у процесі взаємодії його з оптичним випромінюванням

### Вплив різних факторів на відбивання рослинного покриву

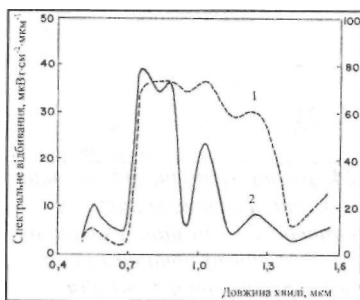


Рис. 4.26. Спектр відбивання: 1 — окремого листка; 2 — рослинного покриву в умовах ближнього поля

Відбивальні властивості рослинного покриву залежать від геометрії покриву (площі та орієнтації листя, кількості листяних шарів), типу рослин, що утворюють покрив. Крім того, значно впливають метеорологічні та кліматичні умови, висота стояння Сонця, наявність хмар, пилу, аерозолей та забруднень

в атмосфері, тип і спектральні властивості ґрунту, агрохімічна обробка полів. Тому ефективне відбивання рослинного покриву характеризується більш контрастною смугою відбивання в області 750-1350 нм порівняно з спектром відбивання поодинокого листка (рис. 4.26).

### Флуоресцентна спектроскопія

#### Механізми флуоресценції

**Фотосинтез** — це процес перетворення світлової енергії Сонця в хімічну енергію рослинних тканин; він складається з таких етапів як поглинання світла молекулою пігмента, перенесення енергії збудження і відбування хімічних реакцій в фотосистемі **ФСП**, де збудження поглинутої світлової енергії супроводжується виділенням тепла і випромінюванням світла у вигляді флуоресценції хлорофілу.

**Флуоресценція** — це процес, що супроводжується переходом з синглетного рівня на основний, причому цей процес перевищує теплове випромінювання і триває проміжок часу значно більший, ніж період світлових коливань. Флуоресценція складається із збудження молекули речовини, здатної флуоресцювати (**флуорофора**) на певній довжині світлової хвилі і випромінювання світла на більшій довжині хвилі. Встановлено, що близько 5% енергії збудження перетворюється у випромінювання енергії хлорофілом. Співвідношення між флуоресценцією хлорофілу і загальним процесом фотосинтезу мають досить складний характер; процес реєстрації флуоресценції хлорофілу зеленого листа рослини може бути використаний для аналізу стану рослини під впливом різноманітних стресів як в лабораторних, так і в польових умовах.

#### Методи дослідження флуоресценції окремого листка

**Спектрофлуориметрія** інтактного листка дає можливість аналізувати залежність форми та інтенсивності спектрів випромінювання при збудженні флуоресценції хлорофілу. Недоліком цього методу є довготрива-



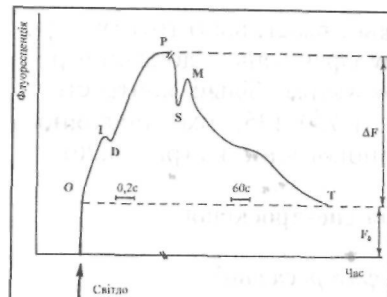


Рис. 4.27. Індукція флуоресценції хлорофілу (пояснення в тексті)

ваного до темряви зеленого листка. Справа в тому, що при освітленні зеленого листка, що був 15/20 хвилин у темряві, флуоресценція хлорофілу в ньому набуває індукційної кінетики (відомої як *ефект Каутського*).

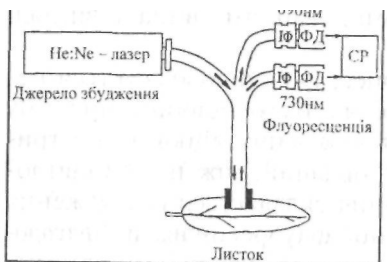


Рис. 4.28. Двопроменевий флуориметр для реєстрації індукції флуоресценції хлорофілу

флуоресценції можна пояснити порушенням зв'язку між фотосистемами I і II у темряві і переходом фотосинтетичного апарата зі стану I у стан II при освітленні. Характер і пояснення зміни інтенсивності флуоресценції хлорофілу в часі подано на рис. 4.27, а схему двохвильового флуориметра — на рис. 4.28.

Оптичний багатоканальний аналіз (ОМА) базується на одночасній реєстрації флуоресценції в синій, зеленій і червоній ділянках спектра за допомогою поліхроматора з дифракційною решіткою і лінійки діодних детекторів (кількість їх може досягати 512). Збудження флуоресценції хлорофілу здійснюється випромінюванням ультрафіолетового лазера. Фактично така система не записує

лість процесу запису спектра, під час якого в листі можуть відбуватися певні зміни, зумовлені індукцією флуоресценції.

Реєстрація індукції флуоресценції дає можливість спостерігати часову кінетику інтенсивності флуоресценції, попередньо адаптованого до темряви зеленого листка.

Причому, в цій часовій поведінці флуоресценції хлорофілу можна виділити два інтервали: швидке зростання флуоресценції до максимального значення  $f_{max}$  протягом 100-500 мс і повільне спадання флуоресценції до стаціонарного рівня  $f_s$  протягом 3-5 хвилин. Індукцію

спектри флуоресценції, а реєструє інтенсивність флуоресценції на всіх довжинах хвиль одночасно. Таким чином, індукцією флуоресценції хлорофілу в даному методі можна знехтувати. Схему ОМА-системи подано на рис. 4.29.

Імпульсна модуляційна флуориметрія передбачає оцінку рівня основної флуоресценції  $F_0$ , максимальної флуоресценції  $F_m$ , а також значень фотохімічного  $qQ$  і нефотохімічного  $qE$  коефіцієнтів

гасіння. Зменшення флуоресценції хлорофілу під час освітлення адаптованого до темряви зеленого листка викликається гасінням флуоресценції: фотохімічне гасіння флуоресценції зумовлюється безпосередньо фотохімічним поділом заряду в реакційному центрі фотосистеми II, коли вторинний акцептор перебуває в окисленому стані і реакційний центр "відкритий"; нефотохімічне гасіння спричиняється іншими, нефотохімічними процесами (наприклад, перенесення енергії завдяки

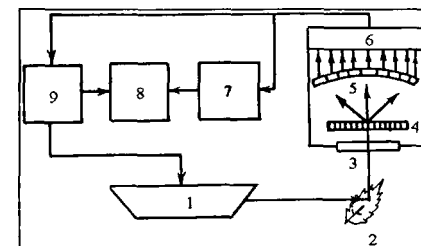


Рис. 4.29. Оптичний багатоканальний аналізатор: 1 — ультрафіолетовий лазер; 2 — листок; 3 — вікно; 5 — лінійка діодів; 6 — оптична багатоканальна система; 7 — підсилювач; 8 — система реєстрації; 9 — тригер

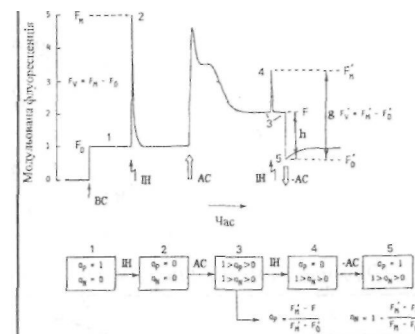


Рис. 4.30. Характер модульованої за частотою інтенсивності флуоресценції хлорофілу залежно від часу: BC — вимірювальне світло для оцінки рівня основної флуоресценції  $F_0$ ; 1H — імпульс насичення для детектування рівня максимальної флуоресценції  $F_m$ ; AC — діюче світло (+ імпульси насичення кожні 10с); g — максимальна змінна флуоресценція, що спостерігається після дії імпульсу насичення; h — змінна флуоресценція протягом індукційного періоду

невипромінювальним переходам у тепло). Техніка імпульсної модуляції флуориметрії передбачає освітлення зразка світловими низькоінтенсивними імпульсами тривалістю 1 мкс, нездатним викликати індукцію флуоресценції (рис. 4.30); внаслідок дії цих імпульсів можна лише визначити базовий рівень флуоресценції  $F_0$  (позиція BC на рис. 4.30). Через нетривалий проміжок часу вмикають насичуючий імпульс білого світла тривалістю від 200 мс до 1 с (позиція IH), що зумовлює зростання флуоресценції до рівня  $F_m$ . Після спадання флуоресценції до рівня  $F_0$  вмикають джерело діючого світла (позиція AC) і отримують індукцію флуоресценції. Імпульси насичуючого світла, що відбуваються кожних 10 с поруч з діючим світлом, викликають появу максимумів флуоресценції на фоні індукційної кривої. Рівень фотохімічного ( $qQ$ ) і нефотохімічного ( $qE$ ) гасіння оцінюють за допомогою таких співвідношень:

$$qQ = \frac{g - h}{g}; \quad (4.26)$$

$$qE = \frac{i - g}{i}. \quad (4.27)$$

Флуоресцентні зображення листка було отримано за допомогою системи, яка містить як джерело збудження флуоресценції Nd-YAG-лазер, що працює в режимі модульованої добротності. Лазерний промінь, збільшений за діаметром, опромінює листок. Випромінювання флуоресценції подається на систему флуоресцентних зображень, що скла-

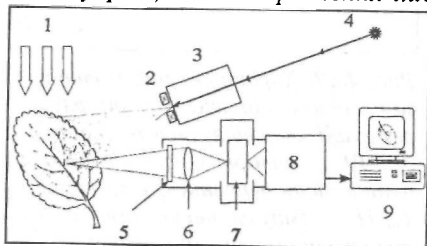


Рис. 4.31. Система флуоресцентних зображень для дослідження розподілу флуоресценції на поверхні листка: 1 — б'є світло; 2 — модулятор; 3 — розширювач променя; 4 — лазер; 5 — фільтр; 6 — лінза; 7 — інтенсифікатор зображень; 8 — CCD-камера; 9 — комп'ютер

дається з інтерференційного фільтра, лінзи, інтенсифікатора зображень та відеокамери, зв'язаної з комп'ютером (рис. 4.31). Такий прилад здатний реєструвати флуоресцентне поле листка на всій його поверхні та вимірювати профілі інтенсивності флуоресценції вздовж та впоперек листка.

Лазерний спектрофлуориметр для вимірювання флуоресценції рослинних покривів у режимі ближнього поля складається з лазера на барвниках як джерела збудження флуоресценції (джерелом накачки для цього лазера був ексімерний лазер Xe-CI з довжиною хвилі 308 нм), телескопа та багатоканального спектрального аналізатора. Випромінювання лазера на барвниках подають на рослинний покрив, який досліджують. Випромінювання флуоресценції надходить крізь телескоп на багатоканальний аналізатор, обладнаний дифракційною решіткою і лінійкою детекторів.

### Флуоресцентні індекси

Функції цих індексів можуть виконувати деякі флуоресцентні параметри, використовувані для кількісної оцінки тих змін, що набуває рослина внаслідок стресових умов. Такими параметрами можуть бути максимальна флуоресценція  $f_m$ ; стаціонарна флуоресценція  $f_s$ ; зменшення флуоресценції  $f_d = f_m - f_s$ ; індекс життєздатності  $Rfd = f_d / f_s$ , який вимірюють на двох довжинах хвиль:  $Rfd(690)$  і  $Rfd(740)$ ; відношення  $f_m(690)/f_m(740)$  і  $f_s(690)/f_s(740)$ ; індекс адаптації до стресів  $A_p = [Rfd(740) + 1] / [Rfd(690) + 1]$ ; фотохімічний  $qQ$  і нефотохімічний  $qE$  коефіцієнти гасіння.

### Флуоресцентні властивості окремого листка

Спектр флуоресценції зеленого листка характеризується максимумами при 440÷450 нм (синя область), 685÷690 нм (червона область). Спектри флуоресценції деяких рослин характеризуються також плечем при 520÷530 нм (зелена область). Типовий спектр випромінювання флуоресценції зеленого листка подано на рис. 4.32.

Згідно з сучасними уявленнями, за флуоресценцію в червоній області спектра відповідає хлорофіл *a*. З

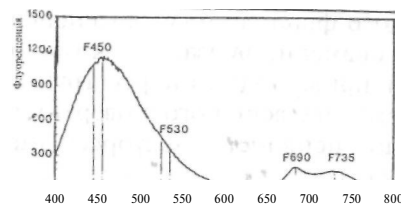


Рис. 4.32. Спектр випромінювання тін), стильбени ( $t$ ~флуоресценції зеленого листка стильбен, рапонтіцин). Можливими кандидатами на роль флуорофорів у зеленій області спектра є алкалоїд берберин і кверцетин. Внесок у флуоресценцію в синій та зеленій областях спектра з боку рибофлавіну, НАДФ і філогідроксину можна вважати незначним.

#### Вплив різних факторів на флуоресцентні властивості окремого листка

На форму спектра випромінювання флуоресценції листка впливають: вміст хлорофілу, фаза розвитку листка, бік та сегмент листка, його вік, ярус рослини, на якому листок розміщений, зовнішні фізичні та хімічні фактори.

**Вміст хлорофілу.** Результати спектрофлуориметрії зеленого листка дають можливість використати як індикатор впливу стресових умов відношення  $F(690)/F(740)$ . Якщо кількість хлорофілу невелика, спектр випромінювання флуоресценції листка характеризується наявністю лише одного максимуму при 690 нм з невеликим плечем при 740 нм. Для блідо-зеленого листка  $F(690) > F(740)$ , тоді як для фотосинтетично активного яскраво-зеленого листка рівні  $F(690)$  і  $F(740)$  флуоресценції приблизно однакові. Збільшення хлорофілу призводить до реабсорбції випромінювання флуоресценції (особливо в короткохвильовій області спектра) і відповідного зменшення  $F(690)/F(740)$ . Про це свідчать і результати одночасного вимірювання спектрів флуоресценції за допомогою ОМА-системи.

Індекс життєздатності  $Rfd$  використовують для оцінки потенційної фотосинтетичної активності листка. Високі (більше 3) значення індекса  $Rfd(690)$  свідчать

про наявність ефективного процесу фотосинтезу, тоді як під впливом зневоднення значення цього індекса не перевищують 1. Те ж саме можна сказати про індекс  $Rfd(740)$ , хоча він завжди менший, ніж  $Rfd(690)$ .

Індекс адаптації до стресів  $A_p$  свідчить про те, як структура фотосинтетичного апарата пристосовується до стресових умов. Зелені, фотосинтетично активні листки рослини демонструють високі значення  $A_p$  (близько  $0,24 \pm 0,26$ ); серйозні порушення фотосинтетичного апарата супроводжуються відповідним зменшенням індекса  $A_p$  на порядок.

**Механічні пошкодження** зумовлюють зменшення максимумів при 690 і 740 нм, причому максимум при 740 нм зменшується швидше; відповідно, відношення  $F(690)/F(740)$  демонструє збільшення порівняно з контрольними зразками. Індукція флуоресценції також характеризується зменшенням таких параметрів як  $f_m$ ,  $f_d$  і  $Rfd$  на обох довжинах хвиль, тоді як  $f_v$  збільшується під впливом механічних пошкоджень. Таку поведінку можна пояснити зникненням міжклітинних проміжків, залишанням рідиною клітин і густішим упакуванням хлоропластів на одиниці площі листка.

**Дегідратація.** Зневоднення рослини зумовлює збільшення відношення  $F(690)/F(740)$ . Параметри індукції флуоресценції хлорофілу можуть бути також використаними для отримання інформації щодо стресової фізіології рослини. Так, зневоднення рослини протягом години спричиняє зменшення: рівнів максимальної флуоресценції  $f_m(690)$  і  $f_m(740)$  та флуоресценції у стаціонарному стані  $f(690)$  і  $f(740)$ ; величини індексів  $Rfd(690)$ ,  $Rfd(740)$  і  $A_p$ . Величини коефіцієнтів гасіння  $qQ$  і  $qE$  теж перебувають під впливом стресових умов; зневоднення рослини призводить до зменшення  $qQ$  і збільшення  $qE$ .

**Вплив температури** на флуоресцентні характеристики листка не визначається при утриманні рослини в межах від  $5 \pm 10$  °C до  $30 \pm 40$  °C протягом невеликих проміжків часу. Триваліша (кілька годин) дія високих температур спричиняє дегідратацію з відповідними наслідками. Довготривалий (кілька днів або тижнів) вплив низьких (близько 10 °C) або високих (близько

30 °C) температур призводить до зміни стану фотосинтетичного апарата і його функціонування. Так, низькі температури зумовлюють значні зменшення максимумів при 690 і 740 нм; індукція флуоресценції ледве спостерігається або взагалі відсутня при низьких температурах.

*Дефіцит азоту.* Після припинення постачання рослини азотом або зменшення його рівня нормальний розвиток рослини триває протягом 2/3 тижнів, після чого відбуваються певні зміни флуоресцентних параметрів і збільшення величин  $F(690)/F(740)$  і  $Rfd$ .

*Сольовий стрес* спричиняє зменшення засвоєння двоокису вуглецю і рівня продукції біомаси. Тривалий вплив сольового стресу супроводжується руйнуванням хлорофілу з відповідним зменшенням індексів  $Rfd$  і  $A_p$ .

*Вплив забруднень.* Дослідження характеру індукції флуоресценції хлорофілу зеленого листка залежно від присутніх у повітрі забруднень свідчать про такі зміни індукційних кривих:  $SO_2$  і  $O_3$  зумовлюють зростання /-рівня і запізнення спадання флуоресценції від максимуму  $P$ ; такий вплив можна пояснити участю  $SO_2$  в окислювальному процесі і руйнуванням фотосистеми  $ФСП$ ; тоді як  $O_3$  вступає в реакції з клітинними мембранами;  $NO_2$  призводить до істотного зростання рівня /, що можна пояснити окислювальними властивостями цього агента та його здатністю виступати у ролі акцептора електронів.

#### *Флуоресцентні властивості рослинних покривів*

Флуоресценція рослинних покривів у природних умовах трохи відрізняється від тієї, що спостерігається на рівні окремого листка. По-перше, слід відзначити неоднорідність розподілу хлорофілу. Ця гетерогенність пов'язана з різним віком листка і, відповідно, з неоднаковою швидкістю фотосинтезу, концентрацією пігментів, залежністю фізіологічного стану рослин від умов природного освітлення, внесення агрохімічних препаратів, водних і температурних стресів, часу доби та пори року. Експериментальні дані свідчать про те, що спектр випромінювання флуоресценції характери-

зується зменшенням на 25% максимуму в синій області спектра та майже повним пригніченням червоних максимумів при переході від окремого листка до рослинного покриву, якщо довжина хвилі збудження дорівнює 337 нм. У разі збудження на довжині хвилі 632 нм спостерігається інтенсивне зростання флуоресценції в червоній області спектра. Це можна пояснити тим, що ультрафіолетове випромінювання не проходить крізь епідерміс і не досягає мезофільних клітин.

#### *Вплив різних факторів на флуоресценцію рослинного покриву*

За допомогою лазерного спектрофлуориметра було досліджено флуоресценцію рослинного покриву в режимі ближнього поля залежно від таких типових для навколишнього середовища газів як  $NO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ . Було зареєстровано зростання рівня флуоресценції протягом дня під впливом  $O_3$  і  $SO_2$ . У той же час виявлено, що руйнівні ефекти  $NO_2$  зростають у темряві внаслідок токсичної дії нітритів. Щодо впливу процесів дегідратації, то слід зазначити, що відношення  $F(690)/F(740)$  змінюються однаково при вимірюваннях як на рівні одного листка, так і на рівні рослинного покрива.

Отже, техніка флуоресцентної спектроскопії дає можливість реєструвати й аналізувати вплив різноманітних природних і антропогенних стресів на рослину, а саме: агрохімічних препаратів, зневоднення, механічних пошкоджень, температури, нестачі азоту, забруднення біосфери тощо.

#### **ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ БІОСФЕРИ**

Дистанційні методи поділяються на два основних типи: *пасивні* й *активні*. Пасивні методи ґрунтуються на вимірюванні природного теплового або відбитого сонячного випромінювання. Активні методи передбачають використання штучних джерел випромінювання (насамперед лазерів) та реєстрацію відбитого випромінювання або флуоресценції об'єктів, що досліджують-

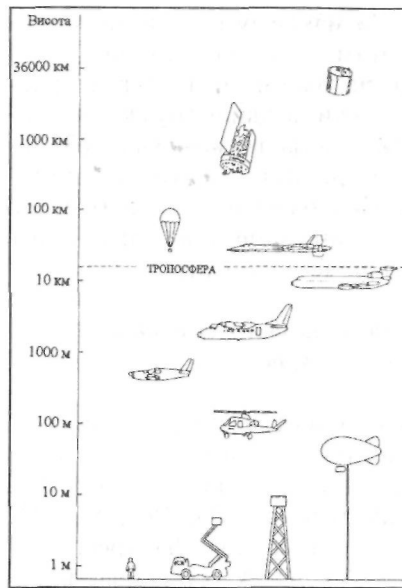


Рис. 4.33. Засоби дистанційного зондування

випромінювання, що дає змогу переносити енергію на великі відстані. Вони також характеризуються більшою чутливістю та просторовим розділенням. Недоліком активних методів є висока вартість. Принципово можлива реєстрація індукції флуоресценції під час дистанційного зондування рослинних утворень; проблему попередньої адаптації в темряві можна вирішити шляхом лазерного опромінення рослинного покриву вночі.

Сучасні методи дистанційного зондування передбачають використання різноманітної апаратури — від переносних приладів та платформ до авіаносіїв і супутників (рис. 4.33).

#### Дистанційне зондування атмосфери

##### Взаємодія оптичного випромінювання з атмосферою

Під час проходження крізь атмосферу оптичне випромінювання зазнає ослаблення, що визначається за законом Бера:

ся. Пасивні методи мають певні обмеження: залежність інформації, що реєструється, від спектральних характеристик та положення Сонця, метеорологічних і кліматичних умов, оптичних параметрів атмосфери та ґрунту. Активні методи дають можливість зондувати об'єкт вузькою спектральною лінією, що разом з плавним перестроюванням частоти дає змогу збуджувати певні атоми й молекули. Перевагою цих методів є мала розбіжність лазерного

де  $\tau$  — коефіцієнт пропускання,  $\gamma$  — коефіцієнт ослаблення,  $z$  — довжина оптичного шляху.

Величина коефіцієнта ослаблення  $\gamma$  залежить від процесів поглинання молекул  $\alpha_M$ , розсіювання молекул  $\beta_M$ , поглинання аерозолів  $\alpha_A$  та розсіювання аерозолів  $\beta_A$ , що наявні в атмосфері:

$$\gamma = \alpha_M + \beta_M + \alpha_A + \beta_A, \quad (4.29)$$

Кожний з коефіцієнтів, означених вище, залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання (рис. 4.34). Термін, що враховує поглинання і розсіювання, називається *послаблення*. Інколи доцільно вживати такі терміни як *переріз поглинання*  $\sigma_a$  та *переріз розсіювання*  $\sigma_s$ , пов'язані з відповідними коефіцієнтами співвідношеннями:

$$\alpha = \sigma_a N_a, \quad (4.30)$$

$$\beta = \sigma_s N_s, \quad (4.31)$$

де  $N_a$  і  $N_s$  — концентрації частинок, що поглинають та розсіюють відповідно



Рис. 4.34. Спектральна залежність коефіцієнтів ослаблення компонентів атмосфери

##### Поглинання атмосфери

Основними газами атмосфери, здатними поглинати оптичне випромінювання, є водяна пара, двоокис вуглецю, озон, кисень, оксид вуглецю, метан і оксиди азоту.

Особливо багатими на лінії поглинання є асиметричні молекули, такі як  $H_2O$ ,  $O_3$ . Молекули лінійні за своєю структурою ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $CO$ ,  $O_2N_2$ ) мають меншу кількість ліній на спектральний інтервал, хоча спектри цих молекул можуть бути складними (як, наприклад, у молекули метану). Поглинання відбувається завдяки переходам між коливальними та обертальними рівнями. Крім того, молекули основних компонентів атмосфери - азот і кисень - внаслідок своєї симетричної структури позбавлені електричного дипольного моменту і не беруть участі в процесі поглинання.

Спектральне пропускання атмосфери протягом 1820-метрового шляху на рівні моря наведено на рис. 2.59. Молекули, що відповідають за кожну смугу поглинання, зображені у верхній частині рисунка. Об'ємна концентрація  $H_2O$  та  $CO_2$  в атмосфері залежить від кліматичних умов, висоти над рівнем моря, географічної широти. Так, концентрація  $H_2O$  в атмосфері може змінюватися від  $10^{-3}$  до 1%;  $CO_2$  - від 0,03 до 0,04%.

#### Розсіювання атмосфери

Процес розсіювання оптичного випромінювання не супроводжується втратами енергії, але характеризується просторовим перерозподілом випромінювання, що зумовлює істотне зменшення його інтенсивності. Залежно від співвідношення між відносним показником заломлення, розмірами частинок і довжиною хвилі оптичного випромінювання (табл. 4.2) розрізняють розсіювання Релея, Дебая і Мі. Оскільки розміри молекул повітря становлять декілька ангстрем, то вони демонструють розсіювання Релея, тоді як частинкам аерозолей притаманне розсіювання Мі. Процеси взаємодії оптичного випромінювання із значно більшими частинками, такими як краплини води в тумані, хмарах, дощу або снігу, описуються на основі теорії дифракції.

#### Розбіжність лазерного випромінювання

Лазерний промінь характеризується гаусовим розподілом профілю інтенсивності в поперечному перерізі. Радіус променя  $\omega$  визначається як відстань у по-

перечному напрямку від осі променя до точки, в якій інтенсивність зменшується в  $1/e^2$  величини, яку вона має на осі (рис. 4.35). Виділимо два важливих параметри гаусового променя, за допомогою яких описують поширення лазерного випромінювання: розмір поперечника променя  $\omega(z)$  на відстані  $z$  від найбільш вузького поперечника променя і радіус кривизни фазового фронту  $R(z)$ :

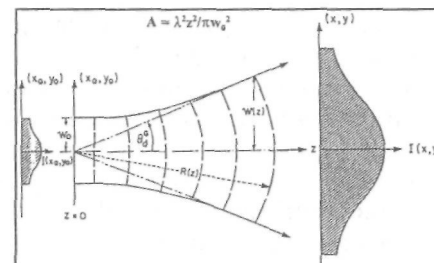


Рис. 4.35. Розбіжність гаусового променя (пояснення в тексті)

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda / \pi \omega_0^2)^2 z^2}; \quad (4.32)$$

$$R(z) = 1 + (\omega_0^2 / \lambda z)^2, \quad (4.33)$$

де  $\omega_0$  - радіус найвужчої частини променя;  $\lambda$  - довжина хвилі.

Промінь розходить з відстанню; кут  $\theta$  розбіжності променя визначається за виразом:

$$\theta = \omega(z)/z = \lambda / \pi \omega_0. \quad (4.34)$$

Через те, що в формуванні лазерного променя беруть участь тільки фотони з однаковими напрямками поширення і фазами, лазерне випромінювання характери-

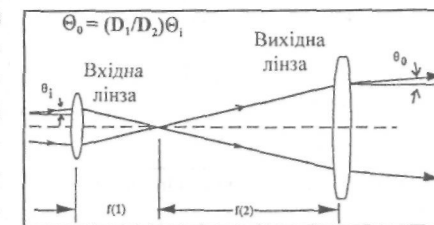


Рис. 4.36. Принцип дії коліматора

зується малими значеннями розбіжності. Так, розбіжність лазерного випромінювання в мілірадіанах становить: *He:Ne*-лазера - 0,7; аргонного лазера - 0,7;

CO<sub>2</sub>-лазера — 2; рубінового лазера — 3÷5; напівпровідникового лазера — 32÷320.

Розбіжність лазерного випромінювання можна значно зменшити за допомогою *коліматора*, що являє собою дві послідовно розміщених лінзи з фокусними відстанями  $f_1$  і  $f_2$ , причому фокуси обох лінз містяться в одній точці (рис. 4.36). Діаметр колімованого променя визначається за виразом:

$$D_0 = (f_2 / f_1) D_i, \quad (4.35)$$

де  $D_0$  — діаметр неколімованого променя. Основним результатом колімації лазерного променя є зменшення розбіжності до рівня:

$$\theta_0 = (f_1 / f_2) \theta_i = (D_i / D_0) \theta_i. \quad (4.36)$$

Якщо направити на поверхню Місяця лазерний промінь, то діаметр світлової плями становитиме близько 400 км; застосування ж коліматора дасть змогу зменшити цей діаметр до 4 км.

### Лазерне дистанційне зондування

В основі лазерного дистанційного зондування лежать процеси реєстрації поглинання, розсіювання та флуоресценції.

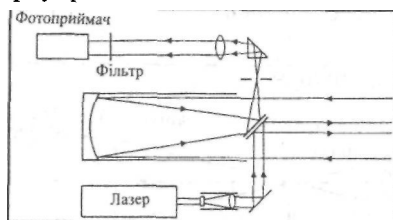


Рис. 4.37. Лідар з коаксіальною конфігурацією

лазерного випромінювання, зміну яких вони реєструють, а саме:

1. Лідар на основі реєстрації зворотного випромінювання — інтенсивність і поляризація;

2. Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання — поглинання;

3. Доплерівський лідар — фазовий зсув;

4. Лідар на основі реєстрації флуоресценції — інтенсивність на довжині хвилі флуоресценції;

5. Лідар на основі реєстрації комбінаційного розсіювання — інтенсивність на довжині хвилі комбінаційних переходів.

З точки зору конструкції лідари діляться на *бістатичні*, в яких лазер і приймач просторово розділені, і *моностатичні*, що передбачають розташування лазера і приймача в одному місці. Останній тип лідарів може являти собою коак-

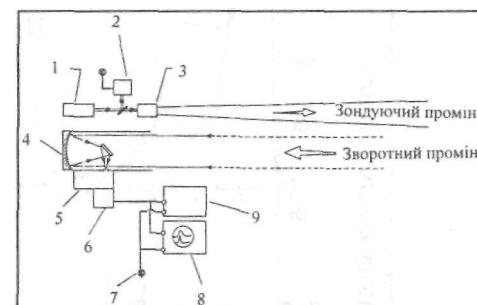


Рис. 4.38. Лідар з біаксіальною конфігурацією: 1 — лазер; 2 — система регулювання лазерного променя; 3 — коліматор; 4 — сферичне дзеркало; 5 — спектроаналізатор; 6 — фотоприймач; 7 — вхід сигналу синхронізації; 8 — монітор; 9 — комп'ютер

сіальну систему, в якій лазерний промінь збігається з оптичною віссю приймача (рис. 4.37), або *біаксіальну* систему, якщо прямий і зворотний промені поширюються різними траєкторіями (рис. 4.38).

### Лідар на основі реєстрації зворотного розсіювання

Зворотне розсіювання, що реєструється лідарною системою, описується *лідарним рівнянням*:

$$P_r(R) = P_0 \left( \frac{c\tau}{2} \right) \beta(R) S_r \cdot R^{-2} \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r) dr \right], \quad (4.37)$$

де  $P_r(R)$  — миттєва потужність, що реєструється приймачем у момент часу  $t$ ;  $P_0$  — потужність, що пропускається об'єктом в момент часу  $t_0$ ;  $c$  — швид-

кість світла;  $\tau$  — тривалість імпульсу;  $\beta$  — коефіцієнт об'ємного розсіювання атмосфери;  $R$  — дальність;  $S$  — ефективна площа приймача;  $a$  — коефіцієнт об'ємної екстинкції атмосфери.

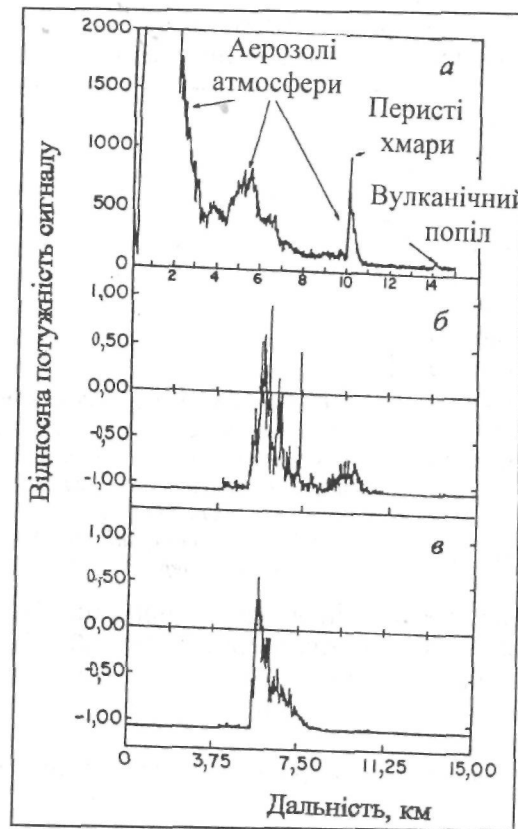


Рис. 4.39. Приклади вимірювання лідаром зворотного розсіювання об'єктів атмосфери

На рис. 4.39 наведено приклади вимірювання лідарного зворотного розсіювання залежно від висоти: до 10 км зареєстровано присутній в атмосфері тонкий шар перистих хмар, а на висоті 14 км — шар вулканічного попелу.

#### Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання

Метод базується на реалізації істотної залежності коефіцієнта об'ємної екстинкції від довжини світлової хвилі. В основу роботи диференційного лідара покладено принцип опромінювання об'єкта, що контролюється, світлом із різними довжинами хвиль. Випромінювання з однією ( $\lambda_0$ ) довжиною хвилі, що збігається з лінією поглинання об'єкта (газу чи забруднення) поглинається об'єктом, тоді як випромінювання з іншою ( $\lambda_0$ ) довжиною хвилі, що далека від лінії поглинання, набуває пружного розсіювання (рис. 4.40). Критерієм оцінки забруднення атмосфери є відношення сигналів, що реєструються на обох довжинах хвиль. Лідар такого типу отримав в англomовній літературі назву DIAL (Differential Absorption Lidar) або DAS (Differential Absorption And Scattering).



Рис. 4.40. Принцип дії лідара на основі реєстрації диференційного поглинання

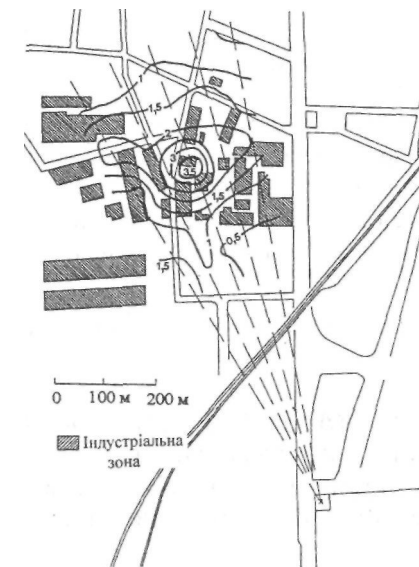


Рис. 4.41. Результати дослідження розподілу двоокису азоту в атмосфері над хімічним заводом (цифрами наведено концентрацію  $\text{NO}_2$  в млн")



Як приклад можливого застосування лазерного диференційного лідара можна навести результати дослідження розподілу  $NO_2$  в атмосфері над хімічним заводом (рис. 4.41).

### Допплерівський лідар

При опромінюванні об'єкта, що рухається зі швидкістю  $V$ , світлом певної довжини хвилі  $\lambda$  відбувається розсіювання світла, причому частота (довжина хвилі) розсіяного світла залежить від швидкості руху об'єкта. В основі такої зміни частоти лежить *ефект Допплера*. Допплерівський зсув  $\Delta\omega$  частоти світла, розсіяного під кутом  $\theta$  частинкою, що рухається зі швидкістю  $V$ , описується виразом:

$$\Delta\omega = \frac{4\pi V}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi, \quad (4.38)$$

де  $\varphi$  — кут між напрямком швидкості  $V$  і напрямком поширення світла.

У реальній ситуації дистанційного зондування об'єктів навколишнього середовища доплерівський лідар опромінює ансамбль частинок, що рухаються з різною швидкістю. Для оцінки сигналу, що реєструється приймачем доплерівського лідара, зручно користуватися поняттям *доплерівський спектр*:

$$P_r = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Delta\nu_D) d(\Delta\nu_D), \quad (4.39)$$

де  $S(\Delta\nu_D)d(\Delta\nu_D)$  відповідає потужності випромінювання в інтервалі частот від  $\Delta\nu_D$  до  $\Delta\nu_D + d(\Delta\nu_D)$ .

З урахуванням зв'язку між  $\Delta\nu_D$  і швидкістю руху частинки  $V_r$  останнє рівняння можна переписати як:

$$P_r = \int_{-\infty}^{\infty} S(V_r) dV_r. \quad (4.40)$$

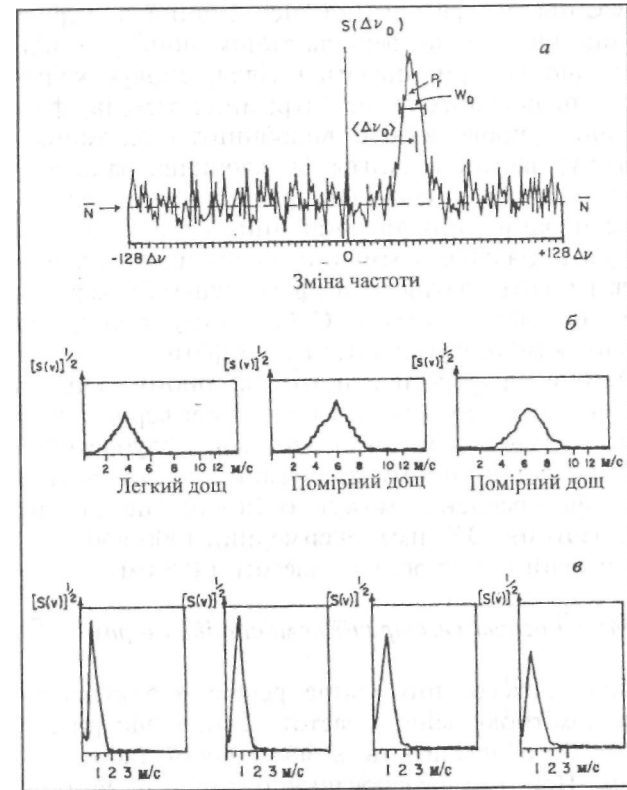


Рис. 4.42. а. Типовий доплерівський спектр та його основні параметри:  $\bar{N}$  — середній рівень шуму;  $P_r$  — потужність сигналу;  $W_D$  — спектральна напівширина;  $\langle \Delta\nu_D \rangle$  — середній доплерівський зсув;  $S(\Delta\nu_D)$  — спектральна густина потужності. б. Допплерівські спектри, отримані для краплин дощу. в. Допплерівські спектри, отримані для снігу

На рис. 4.42 наведено типовий доплерівський спектр та його основні параметри, а також вплив факторів навколишнього середовища (дощу і снігу) на характер цього спектра.

### Лідар на основі реєстрації флуоресценції

Багато компонентів атмосфери мають здатність флуоресцювати. З точки зору контролю навколишнього середовища перспективними можна вважати за-

стосування флуоресцентної дистанційної спектроскопії для оцінки в атмосфері частинок попелу з підприємств, що використовують вугілля; сполук кальцію і ртуті з плавильних та металургійних заводів, флуоридів, що супроводжують виробництво алюмінію або фосфору; частинок сульфатів, хлоридів, ванадію, миш'яку, оксидів і сульфідів різноманітних елементів. Серед неорганічних та органічних сполук, що супроводжують діяльність хімічних та промислових підприємств і мають здатність до флуоресценції, варто виділити такі:  $AlF_3$ ,  $Al(SO_4)$ ,  $CaF_2$ ,  $CaSO_4$ ,  $CuSO_4$ ,  $HgSO_4$ , криоліт, кам'яновугільний газ, фосфати.

Методи флуоресцентного лазерного зондування дуже чутливі через малі тиски атмосфери, при яких відсутні зіткнення молекул, що гасять флуоресценцію.

При дистанційному зондуванні як джерела збудження флуоресценції можуть бути використані такі лазери: азотний (337 нм), ексимерний (306 або 351 нм), неодимовий із потроєнням частоти (455 нм).

#### Лідар на основі реєстрації комбінаційного розсіювання

Якщо розсіювання світла речовиною супроводжується помітною зміною частоти світла, що розсіюється, то його називають *комбінаційним* (або *раманівським*). Цей тип розсіювання оптичного випромінювання включає втрату або набуття кванта коливальної енергії молекулою. Йдеться про непружне світлове розсіювання, коли фотон, що падає, має енергію значно більшу, ніж енергія, яку коливальний квант втрачає через збудження молекули; залишок енергії розсіюється як фотон зі зменшеною частотою.

З позицій квантової механіки ефект комбінаційного розсіювання можна пояснити участю *віртуальних станів*. Молекула може перебувати в основному ( $\nu = 0$ ) або нижньому збудженому ( $\nu = 1$ ) коливальних станах. Поглинання фотона з енергією  $h\nu_{36}$  зумовлює збудження молекули на віртуальний рівень; якщо перехід з цього рівня в основний не супроводжується зміною частоти, розсіювання називається *релеєвським*. Якщо молекула переходить з основного ( $\nu = 0$ ) коливального

рівня на віртуальний, а потім повертається на перший збуджений ( $\nu = 1$ ) коливальний рівень, то вона випромінює фотон з енергією  $h(\nu_{36} - \nu_{\nu})$ . Цей процес називається *стоксовим розсіюванням*. Якщо збуджується молекула, що перебуває на рівні  $\nu = 1$ , а перехід здійснюється між віртуальним та основним ( $\nu = 0$ ) рівнем, то такий процес називається *антистоксовим розсіюванням*. Спектральні лінії, що відповідають релеєвському та комбінаційному розсіюванню, наведено на рис. 4.43.

Лідар на основі комбінаційного розсіювання може бути застосований для визначення наявності та кількісної оцінки атмосферних молекул, таких як  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $C_2H_4$  та ін. Блок-схему приладу для реєстрації спектрів комбінаційного розсіювання наведено на рис. 4.44. Джерелом збудження є YAG-лазер, довжина хвилі випромінювання якого становить 266 нм (четверта гармоніка). Саме на цій довжині хвилі світіння неба мінімальне. Випромі-

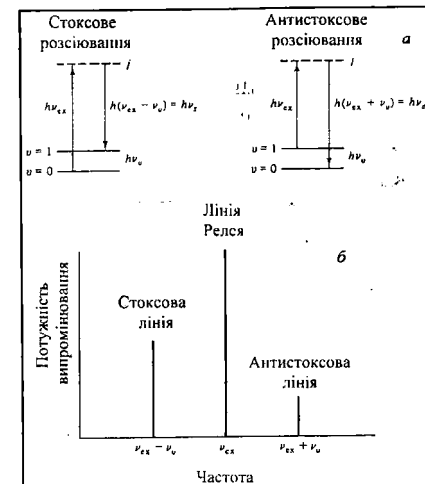


Рис. 4.43. а. Переходи молекули з віртуального рівня на основний, що супроводжуються стоксовим і антистоксовим розсіюванням; б. Спектральні лінії, які відповідають релеєвському та комбінаційному розсіюванню

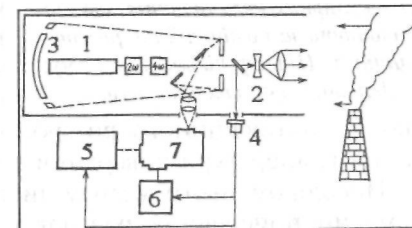


Рис. 4.44. Блок-схема лідара на основі реєстрації комбінаційного розсіювання: 1 — лазер; 2 — коліматор; 3 — сферичне дзеркало; 4 — фотоелектронний перетворювач; 5 — телевізійна система; 6 — фотоприймач; 7 — спектрограф

нювання лазера 1 проходить крізь коліматор 2; відбите від об'єкта випромінювання потрапляє на сферичне дзеркало 3, що спрямовує світло на вхід фотоелектронного перетворювача 4, електричний сигнал з виходу якого потрапляє на систему реєстрації, що складається з телевізійної системи 5, спектрографа 6 і фотоприймача 7.

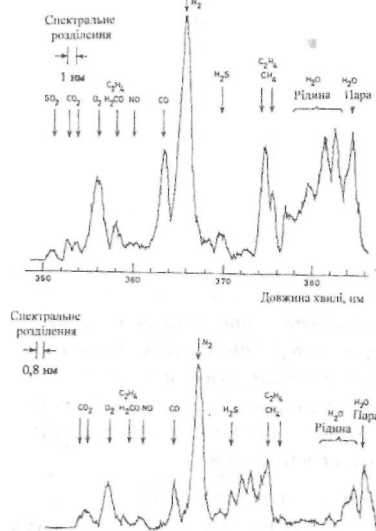


Рис. 4.45. Спектральний розподіл молекулярних компонентів, що відповідають за комбінаційне розсіювання: а. Шлейф нафтового диму; б. Автомобільні вихлопні гази

Перевагою методу є те, що спектральні комбінаційні зсуви специфічні для кожної молекули (рис. 4.45); інтенсивність кожної лінії пропорційна концентрації кожного компонента; вузькі спектральні лінії та комбінаційні зсуви обмежують вплив прямого та розсіяного випромінювання; метод характеризується просторовим і часовим розділенням. Слід також відзначити можливість досліджень об'єктів, що перебувають у рідкому стані або містять у собі воду; за допомогою методів спектроскопії комбінаційного розсіювання можливо вимірювання температури поверхні водойм.

Недоліком цього методу дистанційного зондування є малий поперечник розсіювання, що вимагає використання потужних лазерів та складних колімаційних систем.

#### Застосування лідарів при дистанційному зондуванні атмосфери

Розглянемо основні напрями дистанційного зондування атмосфери за допомогою лідарів.

**Визначення висоти хмар.** Якщо лазерний імпульс відбивається від хмари, то відстань до неї оцінюється як

$$R = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (4.41)$$

де  $\Delta t$  — проміжок часу між посиленням і детектуванням імпульсу;  $c$  — швидкість світла.

У сонячний день можна визначити висоту хмар на рівні 30÷3000 м з точністю  $\pm 6$  м.

**Дослідження структури і властивостей хмар.** Ця техніка базується на вимірюванні інфрачервоного випромінювання кришталіків льоду, наявних у високо розташованих хмарах.

**Вимірювання параметрів вітру.** В основі методу лежить реєстрація діоплерівських частотних зсувів, що залежать від швидкості руху повітряних частинок:

$$\Delta\nu = 2V/\lambda, \quad (4.42)$$

де  $V$  — швидкість руху повітряних частинок,  $\lambda$  — довжина хвилі лазерного випромінювання. Наприклад, частотний зсув випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) для частинок, що рухаються зі швидкістю 1 м/с, становить 200 кГц.

**Визначення вологості.** Ця техніка ґрунтується на оцінці густини молекул і водяної пари за вимірювання частоти коливальних і обертальних комбінаційних переходів.

**Оцінка опадів.** Лазерне випромінювання здатне дифрагувати на частинках опадів; характер дифракційної картини залежить від розмірів і густини частинок.

**Вимірювання температури.** Форма спектра комбінаційного розсіювання азоту, що міститься в атмосфері, залежить від температури, яку можна оцінити шляхом вимірювання інтенсивності комбінаційного розсіювання на двох довжинах хвиль.

## Дистанційне зондування ґрунту

### Відбивання оптичного випромінювання від природних поверхонь

Одним з основних параметрів, що характеризують відбивання оптичного випромінювання від поверхні, є *спектральне відбивання* — залежність інтенсивності випромінювання, що досягає детектора, від довжини світлової хвилі. В техніці дистанційного зондування спектральне відбивання виражається за допомогою таких термінів як *коефіцієнт яскравості (відбивання)* та *коефіцієнт відбивання (альbedo)*. Визначається відбивання  $\rho$  за формулою (4.25).

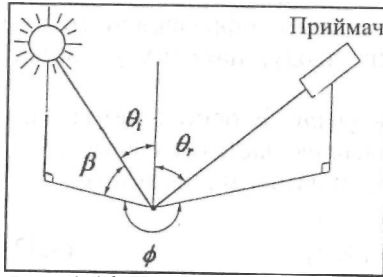


Рис. 4.46. Кут, які використовують під час реєстрації та аналізу відбивання від ґрунтової поверхні:  $\beta$  — підняття Сонця над горизонтом;  $\theta_i$  — падіння сонячних променів на земну поверхню;  $\theta_r$  — відбивання сонячних променів від земної поверхні;  $\phi$  — азимут

Властивість поверхні ґрунту відбивати (розсіювати) випромінювання, що падає на неї, можна охарактеризувати *альbedo* — відношенням потоку, розсіюваним плоским елементом поверхні в усіх напрямках, до потоку, що падає на цей елемент.

### Нерівність ґрунтової поверхні

Кожна ґрунтова поверхня має складний ансамбль структурних елементів, що визначають рівень нерівності ґрунту. Розглянемо відбивання оптичного випро-

мінювання від нерівної поверхні, що характеризується нерегулярністю  $\Delta h$  (рис. 4.47). Можна вважати, що фазовий зсув між променями, які відбиваються від цієї поверхні та від поверхні, для якої  $\Delta h = 0$ , буде визначатися за виразом:

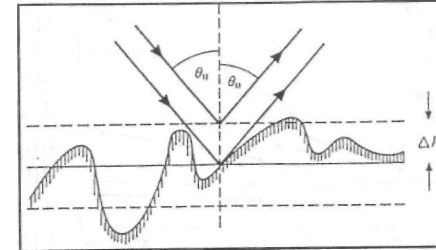


Рис. 4.47. Відбивання оптичного випромінювання від нерівної поверхні, яка характеризується нерегулярністю  $\Delta h$

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta h \cdot \cos\theta_i}{\lambda}. \quad (4.43)$$

Якщо  $\Delta\varphi < \pi/2$ , поверхня вважається достатньо рівною, щоб відбивання було дзеркальним. У цьому випадку  $\frac{\Delta h \cos\theta_i}{\lambda} < 1/8$ . Звідси можна отримати так званий *критерій Релея*:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos\theta_i}. \quad (4.44)$$

Цей критерій характеризує вплив нерівності ґрунту на перехід відбивання від дзеркального до дифузного залежно від кута падіння і довжини світлової хвилі.

### Вплив хімічних властивостей ґрунту на його відбивання

На відбивання ґрунту істотно впливають вміст гумусу, оксидів заліза й різноманітних світлозabarвлених субстанцій (сполук кремнію і алюмінію, карбонатів кальцію тощо).

Гумус характеризується низьким відбиванням і при великих концентраціях визначає сіро-чорний колір

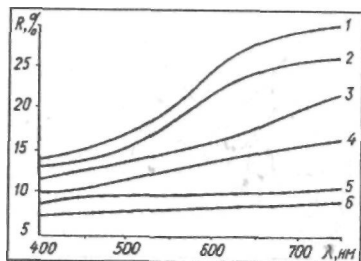


Рис. 4.48. Спектри відбивання  $r(\lambda)/r(730)$  ґрунтів з різною кількістю гумусу: 1 - 0,06%; 2 - 0,08; 3 - 2,5; 4 - 4,7; 5 - 5,2; 6 - 5,7%

Оксиди заліза справляють істотний вплив на спектральне відбивання ґрунтів (рис. 4.49), що в свою чергу визначається рівнем окислювання або гідратації сполук заліза. В цілому закис заліза надає ґрунту голубувато-зеленого кольору (як це спостерігається у болотистих ґрунтах). Рівень гідратації оксидів заліза впливає на характер спектрального відбивання ґрунту: високогідратовані сполуки заліза надають ґрунту жовтого кольору, а низькогідратовані – сіро-коричневого або червонуватого. Величини  $r(530+600)$ ,  $r(700+900)$ ,  $r(1000)$ ,  $r(650)$ — $r(400)$  можна використовувати як спектральні індекси для оцінки сполук заліза на відбивання ґрунту.

Рис. 4.49. Відбивання ґрунту залежно від відносної концентрації оксиду заліза

Світлозабарвлені субстанції. Карбонати й розчинені солі, про яких йшлося у розділі «Едафічні фактори середовища», надають ґрунту світлого забарвлення. В цілому ж їх вплив на відбивання ґрунту значно менший, ніж вплив гумусу та оксидів заліза. Втім, спектральне відбивання деяких ґрунтових горизонтів добре корелює з вмістом цих субстанцій.

ґрунту. Відбивання гумусу монотонно зростає від 400 нм до 750 нм (рис. 4.48). Для кількісної оцінки впливу гумусу використовують як спектральні індекси величини  $r(730)$  або  $[r(730)-r(430)]/r(730)$ . Можливе також застосування величин  $r(520+1320)$ ,  $r(1420+1480)$ ,  $r(1550+1750)$ ,  $r(2080+2320)$ .

### Вплив фізичних властивостей ґрунту на його відбивання

**Розмір частинок ґрунту.** Вплив ґрунтових частинок, розмір яких перевищує 2 мм, на відбивання ґрунту незначний. Можна вважати, що для частинок, розміри яких становлять 2–10 мм, коефіцієнт відбивання майже сталий. Дрібні ж частинки істотно впливають на відбивання ґрунту, причому відбивання ґрунту зменшується із збільшенням їх розмірів.

**Вологість ґрунту.** Вологі ґрунти мають низькі значення коефіцієнта відбивання і відповідно темніші кольори, ніж сухі. В цілому збільшення вмісту води в ґрунті може зменшувати відбивання ґрунту в 2–3 рази без зміни форми кривої спектра відбивання (рис. 4.50).

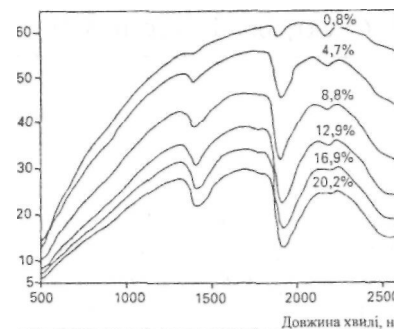


Рис. 4.50. Спектри відбивання ґрунту з різним рівнем вологості

Величини  $\alpha(1400+1500)$  з різним рівнем вологості  $\alpha(1800+1900)$ ,  $\alpha(2080+2300)$  можуть бути використані як спектральні індекси.

**ґрунтові горизонти.** В процесі обробітку ґрунту можливе переміщення певних горизонтів. Доведено, що до глибини 60 см коефіцієнт відбивання ґрунту майже не змінюється порівняно зі значеннями на його поверхні. На більших глибинах спостерігається зростання коефіцієнта відбивання: приблизно в 2 рази в синій і в 4 рази — в червоній областях спектра для глибини 180–200 см.

### Дистанційне зондування ґрунту

Системи дистанційного зондування ґрунту можуть бути пасивними й активними. Зазвичай використовують реєстрацію відбивання оптичного випромінювання видимої, ближньої і далекої інфрачервоної областей. Техніка дистанційного зондування ґрунту дає

можливість здійснювати топографічні вимірювання (розташування і розміри ділянок ґрунту у певному масштабі), визначати розміри ґрунтових частинок, структуру і нерівності поверхні ґрунту, ідентифікувати склад мінеральних частинок, оцінювати вологість ґрунту, висоту і щільність рослинних утворень тощо.

Дистанційне зондування водних середовищ

#### Відбивальні характеристики водних середовищ

Спектральні властивості води залежать від її природи та наявності в її складі різних речовин. Результати, отримані за допомогою супутників, свідчать про такі дані щодо глибини проникнення оптичного випромінювання крізь воду: 10 м для 500–600 нм, 3 м — для 600–700 нм, 1 м для 700–800 нм, 10 см для 800–1100 нм. Під час взаємодії з водою оптичне випромінювання піддається поглинанню й розсіюванню.

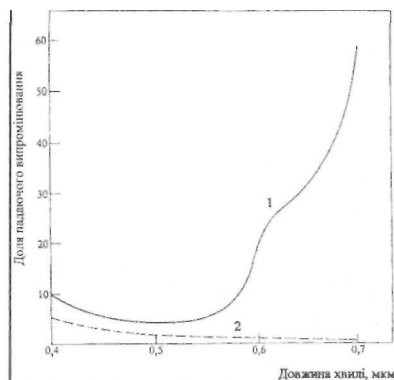


Рис. 4.51. Спектри поглинання (1) і розсіювання (2) води

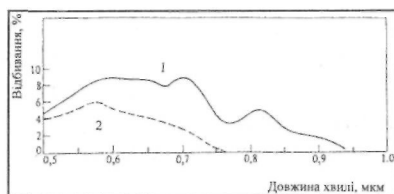


Рис. 4.52. Спектри відбивання води залежно від рівня каламутності: 1 — 99 мг/л суспендованих частинок; 2 — 10 мг/л суспендованих частинок

незначне, особливо порівняно з відбиванням рослинних покривів і ґрунту. Така різниця у відбивальних здатностях допомагає реалізувати дистанційну ідентифікацію і картографування водойм, що демонструють контрастні контури.

Спектри поглинання і розсіювання води наведено на рис. 4.51. Крім того, оптичне випромінювання відбивається від поверхні води, від суспендованих в ній органічних і неорганічних матеріалів та від дна водойми. Спектр відбивання води (рис. 4.52) залежить від її каламутності, зумовленої наявністю суспендованих частинок. Можна вважати, що в області 600–700 нм відбивання води перебуває в лінійній залежності від каламутності. Значною мірою на спектральні характеристики води впливає присутній в ній хлорофіл, збільшення концентрації якого зумовлює зменшення рівня відбивання (рис. 4.53). Така залежність може бути використана для оцінки первинної продуктивності водойм (маси живої матерії, синтезованої рослинами), рівня евтрофікації та забруднення водойм рештками водних рослин та фітопланктону.

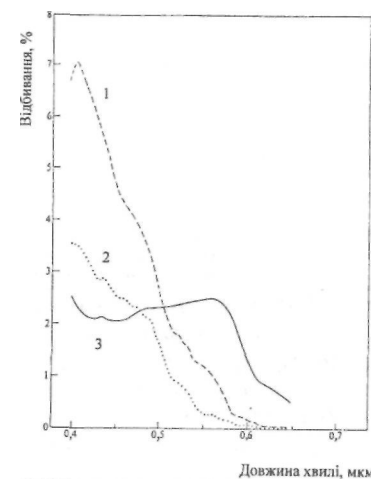


Рис. 4.53. Спектри відбивання води залежно від відносної концентрації хлорофілу: 1 — дуже низька; 2 — низька; 3 — висока концентрація хлорофілу

характеристики води впливає присутній в ній хлорофіл, збільшення концентрації якого зумовлює зменшення рівня відбивання (рис. 4.53). Така залежність може бути використана для оцінки первинної продуктивності водойм (маси живої матерії, синтезованої рослинами), рівня евтрофікації та забруднення водойм рештками водних рослин та фітопланктону.

#### Флуоресцентні характеристики водних середовищ

Перспективними є вимірювання флуоресцентних характеристик водойм, що насамперед пов'язані з хлорофілом і фікоеритрином. Залежність величини максимуму флуоресценції хлорофіла від концентрації останнього має лінійний характер.

Аналіз спектрів випромінювання флуоресценції дає змогу реалізувати якісну й кількісну ідентифікацію водної мікрофлори (рис. 4.54), визначати видову специфічність водоростей і картографувати їх поширення,

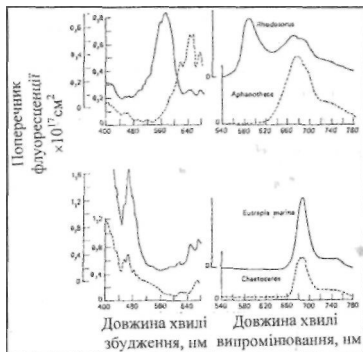


Рис. 4.54. Спектри збудження і випромінювання флуоресценції різних типів нафти. Техніка дистанційного зондування флуоресцентного зондування може бути використана для контролю якості води, визначення й оцінки стоків.

За допомогою техніки дистанційного зондування на основі реєстрації комбінаційного розсіювання можливе вимірювання температури поверхні водойми.

У системах дистанційного зондування води використовують такі джерела збудження флуоресценції як аргонів та неодимові лазери, що працюють в імпульсному режимі.

#### Дистанційне зондування земної поверхні за допомогою супутників

Розглянемо як приклад практичної реалізації дистанційного зондування біосфери застосування супутника Landsat (Land Satellite).

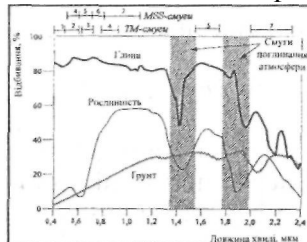


Рис. 4.55. Спектри відбивання рослинних покривів, ґрунту і глинистих утворень та ділянки спектра, які використовують для спектральних індексів

оцінювати розчинену органічну речовину та продукти седиментації.

З точки зору дистанційного зондування забруднення водних середовищ перспективним є метод оцінки товщини нафтової плівки на поверхні води і розмірів нафтових частинок, а також ідентифікація типів нафти.

тичним картографом *TM* (Thematic Mapper). Таким чином, для спектральних індексів використовували 4 ділянки *MSS* і 7 ділянок *TM*. Принцип вимірювань за допомогою супутника пояснює рис. 4.56.

Ділянка *MSS4*: 500+600 нм, зелена область, пов'язана з поглинанням хлорофілу і характеризує відбивання здорових рослин. Крім того, її доцільно використовувати для картографування водойм.

Ділянка *MSS5*: 600+700 нм, червона область. Цю смугу, де відбувається поглинання хлорофілу в здорових зелених рослинах, варто використовувати для розпізнавання рослин, визначення меж і контурів ґрунтових поверхонь і геологічних утворень.

Ділянка *MSS6*: 700+800 нм, відбивальна інфрачервона область. Використовується для оцінки вегетаційної біомаси, ідентифікації урожаю і окреслювання меж розподілу рослинних, ґрунтових і водних площ.

Ділянка *MSS7*: 800+1100 нм, відбивальна інфрачервона область. Використовується для огляду рослинних покривів і оцінки проникності туманів.

Ділянка *TMV*. 450+520 нм, блакитна область. Використовується для картографування прибережних площ, розпізнавання меж розподілу між ґрунтом і рослинністю, детектування культурних посівів.

Ділянка *TM2*: 520+600 нм, зелена область. Характеризує відбивання здорових рослин, можна використовувати також для ідентифікації культурних посівів.

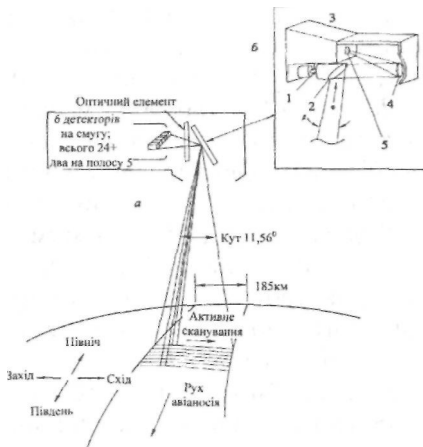


Рис. 4.56. а. Принцип дистанційного зондування земної поверхні за допомогою супутника, б. Система сканування: 1 — двигун; 2 — сканер; 3 — монохроматор; 4 — дзеркало; 5 — щілина

Ділянка *ТМ3*: 630+690 нм, червона область. Використовується для визначення ґрунтових і геологічних меж, а також площ культурних посівів.

Ділянка *ТМ4*: 760+900 нм, відбивальна інфрачервона область. Використовується для визначення вегетаційної біомаси, ідентифікації урожаю і окреслення меж розподілу ґрунтових, рослинних і водних масивів.

Ділянка *ТМ5*: 1,55+1,74 мкм, середня інфрачервона область. Можливе використання для вивчення впливу посух на урожай і аналізу стану рослинних покривів. Крім того, може бути використана для розпізнавання хмар, снігу, льоду.

Ділянка *ТМ&*: 10,40+12,50 мкм, теплова інфрачервона область — для оцінки впливу стресів на рослинні покриви і урожай, зокрема теплових факторів та інсектицидів. Може бути застосована для визначення місцевої геотермальної активності.

Ділянка *ТМ7*: 2,08/2,35 мкм, середня інфрачервона область — важлива для розпізнавання геологічних утворень і визначення ґрунтових меж, а також для кількісної оцінки вологості в ґрунті і рослинах.

#### Вегетаційні індекси

Розглянемо як приклад можливі застосування згаданих вище спектральних ділянок для оцінки об'єктів дистанційного зондування. Так, відношення *ТМ4/ТМ3*, що набуває істотних значень для аналізу рослинних покривів, значно менше при оцінці ґрунтів і майже дорівнює нулю для глини (рис. 4.55). Навпаки, відношення *ТМ5/ТМ7* характеризується протилежними властивостями і може бути використане для оцінки глинистих утворень.

Для оцінки рослинних покривів використовують вегетаційні індекси, в основу яких покладено спектральні ділянки з серії *MSS*, а саме:

Вегетаційний індекс *VI*

$$VI = \frac{MSS1 - MSS5}{MSS7 + MSS5}. \quad (4.45)$$

Трансформований вегетаційний індекс *TVI*

$$TVI = \sqrt{VI + 0,5}; \quad (4.46)$$

Цей індекс позбавлений від'ємних значень.

Перпендикулярний вегетаційний індекс *PVI*

$$PVI = \sqrt{(MSS5_s - MSS5_v)^2 + (MSS7_s - MSS7_v)^2}, \quad (4.47)$$

де індекси *S* і *V* відповідають ґрунту і рослинності.

Індекс яскравості ґрунту *SB*

$$SB = 0,43MSS4 + 0,63MSS5 + 0,59MSS6 + 0,26MSS7. \quad (4.48)$$

Цей індекс враховує можливий пригнічувальний вплив ґрунту на відбивання рослин.

У цілому методи дистанційного зондування за допомогою супутників дають можливість простежити за розвитком рослин на всіх стадіях, здійснювати ідентифікацію рослинних утворень, визначати вплив на рослини шкідників, оцінювати урожай та прогнозувати його в майбутньому, реалізовувати інвентаризацію ґрунтів та картографувати динаміку їх змін внаслідок ерозії й вологості, стежити за процесами евтрофікації водойм, окреслювати межі рослинних, ґрунтових і водних площ.



## Глава 5. ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ, ХРОМАТОГРАФІЧНІ ТА МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ

В основі електрохімічних методів контролю та аналізу компонентів навколишнього середовища лежать процеси, що відбуваються на електродах і в міжелектродному просторі, та реєстрація залежності потенціалу, струму, кількості зарядів або електропровідності від концентрації речовини, що аналізується.

Залежно від того, який параметр реєструється, розрізняють такі електрохімічні методи:

1. Потенціометрія (потенціал);
2. Вольтамперометрія (струм);
3. Кулонометрія (заряд);
4. Кондуктометрія (електропровідність).

Електрохімічні методи характеризуються високою чутливістю, невисокою вартістю і використовуються при аналізі атмосфери, вод, ґрунтів та продуктів харчування.

#### Принципи дії електрохімічних методів

В електрохімічних методах використовують здатність окислювально-відновних реакцій відбуватися не тільки при безпосередньому контакті, але й при їх просторовому видаленні. Розглянемо відновник  $Red$ , та окислювач  $Ox$ , що містяться в різних судинах. Якщо в розчин ввести металеві

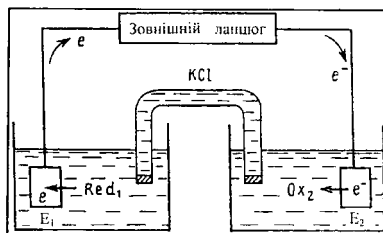
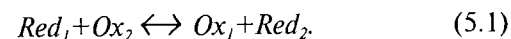


Рис. 5.1. Принцип дії електрохімічних методів (пояснення в тексті)

електроди і замкнути ланцюг зовнішнім провідником,

а розчини з'єднати сольовим містком (рис. 5.1), то відновник буде віддавати електрони першому електроду  $E_1$  і окислюватися ( $Red_1 \rightarrow Ox_1$ ). Електрони на зовнішньому ланцюгу перейдуть до другого електрода  $E_2$ , що передасть їх окислювачу. Останній відновиться ( $Red_2 \rightarrow Ox_2$ ). Таким чином, відбувається реакція:



Процес супроводжується переносом електронів по зовнішньому ланцюгу і іонів — по внутрішньому. Якщо зовнішній ланцюг не пропускати електронів, то таку електрохімічну чарунку можна використати для вимірювання потенціалу.

Один з електродів має реагувати на зміну концентрації речовини, що визначається. Цей електрод називають *індикаторним* або *робочим*. Щоб він не реагував з компонентами речовини, його виготовляють з благородних металів ( $Hg$ ,  $Pt$ ,  $Au$ ) або інертних матеріалів (наприклад, з графіту).

Інший електрод називають *електродом порівняння*; він є точкою для відліку параметра, що вимірюється індикаторним електродом. Зазвичай використовують  $Ag/AgCl$  або каломельні ( $Hg_2Cl_2$ ) електроди. Зовнішній вигляд електрода порівняння — на рис. 5.2.

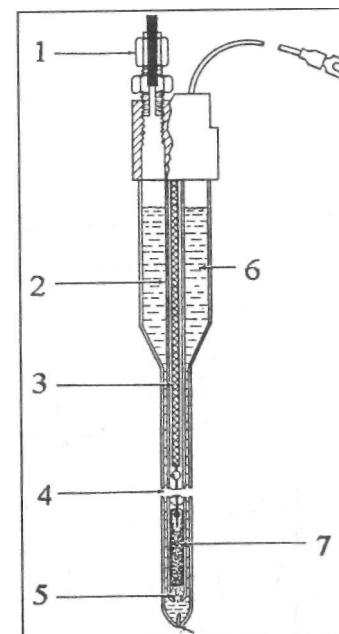


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд електрода порівняння

## Потенціометрія

Метод прямої потенціометрії полягає в тому, що в аналізований розчин занурюють індикаторний електрод і вимірюють його потенціал відносно електрода порівняння. Потім за графіком залежності потенціалу від концентрації визначають концентрацію іона в розчині.

Рівноважний потенціал зв'язаний з концентрацією рівнянням Нернста:

$$E_p = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C(Ox)}{C(Red)} \quad (5.2)$$

Тут  $E^0$  — стандартний електродний потенціал (В);  $R$  — молярна газова стала ( $8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ );  $T$  — абсолютна температура;  $F$  — стала Фарадея ( $96487 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$ ),  $n$  — кількість електронів, що беруть участь у реакції;  $C$

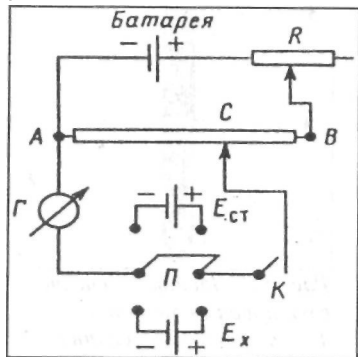


Рис. 5.3. Схема потенціометричного вимірювання: АВ — подільник напруги; С — ковзний контакт; R — опір для калібрування; П — двополюсний перемикач;  $E_{ст}$  — стандартний елемент;  $E_x$  — елемент, що досліджується; К — вмикач

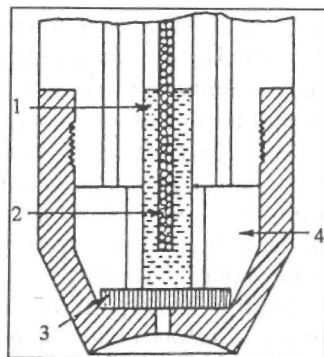


Рис. 5.4. Іонселективний електрод: 1 — внутрішній розчин; 2 — опорний електрод (Ag-AgCl); 3 — пориста мембрана; 4 — резервуар

(Ox) і  $C(Red)$  — концентрації окислювача й відновника відповідно.

Вимірювання потенціалу здійснюють за допомогою потенціометра (рис. 5.3).

Індикаторні електроди можуть бути металевими (з електронною провідністю) та іонселективними (з іонною провідністю). Металевий електрод (Ag, Cu, Cd, Pb) в розчині, що містить власні іони, набуває потенціалу, що залежить від активності (концентрації) цих іонів.

Іонселективний електрод *опорний електрод*; має напівмембрану, що відділяє внутрішню частину електрода (внутрішній розчин) від розчину, що аналізується (рис. 5.4). Ця мембрана має здатність пропускати іони тільки одного сорту в присутності інших іонів. Мембрану виготовляють з твердої, рідкої речовини або скла. Одним з найбільш селективних аналітичних пристроїв є скляний pH електрод, за допомогою якого вимірюють концентрацію іонів водню. Конструкцію скляного електрода наведено на рис. 5.5. Складовими елементами цього електрода є тонка скляна мембрана, внутрішній опорний електрод (срібло або каломель), занурений у буферний розчин (KCl, насичений AgCl або  $Hg_2Cl_2$ ).

Використовують методи прямої потенціометрії для визначення вмісту іонів ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ), pH середовища і при аналізі води, ґрунта і повітря на предмет таких забруднень, як  $NH_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ .

## Вольтамперометрія

Вольтамперометрією називають методи аналізу, що базуються на реєстрації та вивченні залежності струму,

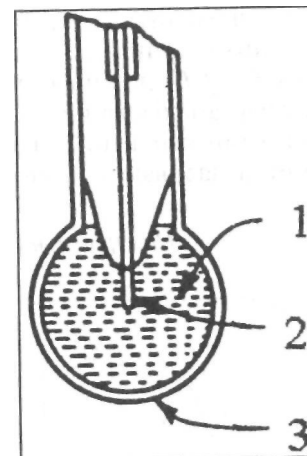


Рис. 5.5. Скляний електрод: 1 — внутрішній розчин; 2 — опорний електрод; 3 — тонка скляна мембрана

що проходить крізь електролітичну чарунку, від зовнішньої прикладеної напруги. Аналіз *вольтамперограми*  $I = f(U)$  дає інформацію про кількісний та якісний склад аналізованого розчину. Якщо використовують ртутний капаючий електрод як індикаторний, то такий метод називають *полярографією*.

### Полярограма та її характеристики

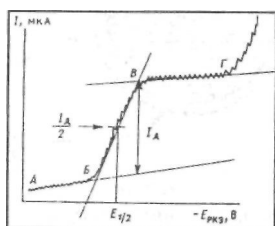


Рис. 5.6. Типова полярограма (пояснення в тексті)

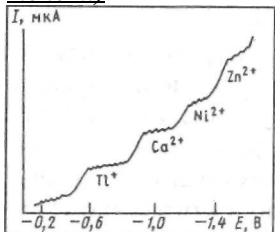


Рис. 5.7. Полярограми і значення потенціалу напівхвилі залежні від природи речовини



Рис. 5.8. Характер зміни імпульсного потенціалу під час нормальної імпульсної полярографії

Типову полярограму зображено на рис. 5.6. Основними параметрами полярограми є *потенціал напівхвилі*  $E_{1/2}$  і *дифузний струм*  $I_d$ . Полярограма має три характерних ділянки: *AB* — зона остаточного струму, *BB* — зона зростання потенціалу, *BG* — зона граничного струму. Величина потенціалу напівхвилі  $E_{1/2}$  залежить від природи речовини (рис. 5.7). Дифузійний струм  $I_d$  пропорційний концентрації речовини, що аналізується, в широких межах.

Якщо реєструється залежність  $dI/dE = f(E)$ , то такий метод називають *диференційною полярографією*; цей метод характеризується більш високою роздільною здатністю.

Якщо напруга поляризації подається у вигляді короткочасних імпульсів, така техніка називається *імпульсною полярографією*. Під час *нормальної імпульсної полярографії* імпульсний потенціал тривалістю близько 70 мс прикладають до електрода наприкінці часу існування (0,5–5 с) ртутної краплини, а струм вимірюють наприкінці

кожного імпульсу потенціалу (рис. 5.8). *Диференційна імпульсна полярографія* передбачає вимірювання струму двічі — на початку і наприкінці імпульсу потенціалу, що дає можливість оцінити похідну від струму за часом  $dI/dt$  (рис. 5.9).

### Метод вольтамперометрії

Цей метод ґрунтується на використанні будь-якого (наприклад, платинового або графітового) індикаторного електрода, крім капаючого ртутного. Найбільш чутливим є метод *інверсійної вольтамперометрії*, що ґрунтується на попередньому осаджуванні досліджуваної речовини на поверхні індикаторного електрода, після чого його розчиняють під час полярографічного контролю.

### Метод полярографії

Схему полярографічної установки для реєстрації полярограм наведено на рис. 5.10. Вона складається з джерела струму, каліброваного опору, вольтметра, амперметра і електролітичної чарунки (рис. 5.10а). Електролітична чарунка містить ртутний капаючий електрод і електрод-порів-

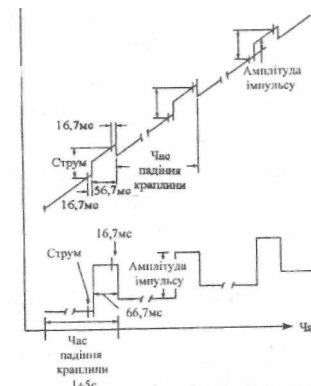


Рис. 5.9. Характер зміни імпульсного потенціалу під час диференційної імпульсної полярографії

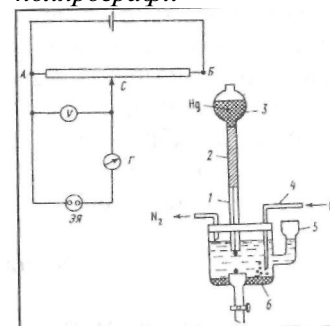


Рис. 5.10. а. Схема полярографічної установки для реєстрації полярограм:

1 — джерело струму; 2 — реохорд; 3 — вольтметр; 4 — гальванометр; 5 — електролітична чарунка; 6. Полярографічна чарунка: 1 — скляний капіляр; 2 — поліетиленовий шланг; 3 — груша з металевою ртуттю; 4 — скляна трубка для введення азоту; 5 — воронка для зміни розчину; 6 — ртутний анод

няння. Ртутний електрод виготовлений з тонкого скляного ( $d/0,05$  мм) капіляра завдовжки 5/10 см, через який з поліетиленової груші витікають через рівні проміжки часу краплини ртуті (рис. 5.106). Режим витікання краплин характеризується постійною поверхнею ртутної краплини і доброю відтворюваністю результатів. Перед вимірюваннями потрібно вилучити кисень за допомогою пропускання будь-якого інертного газу (Ne, He, Ar).

#### Практичне застосування вольтамперометрії

Методи вольтамперометрії використовують для визначення вмісту багатьох хімічних елементів у ґрунті і рослинах, причому можливе одночасне визначення кількох елементів. Метод дає можливість визначати пестициди та гумусові речовини в ґрунті.

Полярографічні методи дають змогу визначати аерозолі різних металів в атмосфері після їх уловлювання фільтрами з подальшим переведенням у розчин; органічні сполуки, присутні у вигляді газів чи пари в атмосфері; забруднення атмосфери типу  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ . Застосовують ці методи і для оцінки вмісту кисню в питній воді.

#### Кулонометрія

Метод кулонометрії ґрунтується на вимірюванні кількості електрики  $q$ , затраченої на електроперетворення (відновлення або окислення) речовини, що аналізується. Згідно з законом Фарадея кількість речовини, що брала участь в процесі електроперетворення, пропорційна кількості електрики, що пройшла через електрод:

$$m = \frac{aM}{nF}, \quad (5.3)$$

де  $m$  — маса речовини, що електроперетворилася;  $q$  — кількість електрики, Кл;  $M$  — молярна маса речо-

вини;  $F$  — стала Фарадея (96487 Кл-моль<sup>-1</sup>);  $n$  — кількість електронів, що брали участь в електрохімічній реакції. Таким чином, вимірювання  $q$  дає можливість оцінити масу речовини  $m$ .

#### Техніка кулонометрії

Розрізняють методи *прямої кулонометрії* (при постійному потенціалі робочого електрода) і *посередньої кулонометрії* (при постійному струмі).

Основним елементом установки є кулонометрична чарунка, що складається з металевих електродів, занурених у розчин (наприклад, платина-срібло у розчині нітрату срібла, або платина-платина у розчині сульфату міді). Можливі конструкції газових кулонометрів, в основі яких лежить вимірювання кисню й водню за електролітичного розкладу води. Процес вимірювання полягає в аналізі залежності струму від часу та розрахунку кількості електрики.

Перевагою методу кулонометрії є висока точність. Він є абсолютним, оскільки дає змогу визначити кількість речовини, а не її концентрацію.

Недоліком методу є довготривалість процесу вимірювань, необхідність ретельного очищення екстракту від домішок.

Застосовується метод кулонометрії для аналізу газоподібних забруднень ( $SO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2S$ ,  $NO_x$ ) в атмосфері, визначення залишків пестицидів у ґрунті.

#### Кондуктометрія

Метод кондуктометрії базується на вимірюванні питомої електропровідності аналізованого розчину. Відомо, що електропровідність  $a$  зв'язана з опором  $R$  співвідношенням:

$$\sigma = \frac{1}{R}. \quad (5.4)$$

Одиниця вимірювання електропровідності — *сіменс* (1 См = 10 м<sup>1</sup>).

Питомий опір розчину між двома електродами, занурених у нього, знаходять за рівнянням:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5.5)$$

де  $l$  — відстань між електродами;  $S$  — площа поверхні електродів;  $\rho$  — питомий опір.

Звідси:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (5.6)$$

$$\chi = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RS} \quad (5.7)$$

Можна казати, що питома електропровідність  $\chi$  (См/см) дорівнює електричній провідності 1 см<sup>3</sup> розчину  $3.5 = 1 \text{ см}^3$  і  $l = 1 \text{ см}$ . У той же час згідно із законом Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (5.8)$$

тобто, питома електропровідність чисельно дорівнює струму, що проходить через шар розчину з перерізом, рівним одиниці, під впливом різниці потенціалів в 1

## В.

Електропровідність розбавлених розчинів електролітів залежить від швидкості руху іонів під впливом поля, від сумарної кількості іонів у розчині та числа зарядів, що переносяться іонами.

Для оцінки електропровідності іонів використовують *еквівалентну електропровідність (рухомість)*:

$$\lambda = V \cdot F. \quad (5.9)$$

Питома й еквівалентна електропровідності зв'язані співвідношенням:

$$\chi = 10^3 c \lambda, \quad (5.10)$$

де  $c$  — концентрація електроліту.

## Процедура вимірювань

Система вимірювань електропровідності складається з судини, заповненої розчином, і двох платинових електродів. Ця чарунка є одним з плечей вимірювального містка. Умова рівноваги містка визначається співвідношенням:

$$\chi = \frac{r_1}{R r_2}, \quad (5.11)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  — постійні опори;  $R$  — калібрований магазин опорів.

Типовими прикладами застосування методу кондуктометрії є контроль детергентів у стічних водах, визначення концентрацій синтетичних добрив у зрошувальних системах, аналіз якості питної води, вимірювання вмісту солей в водних витяжках з ґрунтів. Цей метод використовують також для безперервного контролю атмосферних забруднень, таких як  $SO_2$  та  $H_2SO_4$ .

## ХРОМАТОГРАФІЧНІ МЕТОДИ

### Принципи хроматографії

*Хроматографія* — це метод розділення, виявлення й визначення речовин, що базується на неоднаковості їх поведінки в системі з двох фаз, що не змішуються — *рухомій* і *нерухомій*. Рухомою фазою може бути рідина (розчин суміші речовин, що аналізуються) або газ (суміш газів), нерухомою — тверда речовина або рідина, адсорбована на твердій речовині, яку називають *носієм*. Під час руху рухомої фази вздовж нерухомої кожна

компонента суміші осідає (сорбується) на нерухомій фазі (сорбенті) відповідно до матеріалу сорбенту, затримується і вповільнює свій рух. Через те, що різні компоненти мають різну спорідненість, відбувається просторовий поділ цих компонентів — одні затримуються на початку шляху, інші просуваються вперед тощо.

Перший такий поділ хлорофілу на компоненти спостерігав у 1903 році М.С. Цвет. Оскільки компоненти відрізнялись за кольором, метод був названий *хроматографією*.

### Методи хроматографії

Згідно зі способом хроматографування розрізняють *колонкову* і *площинну* хроматографію. В першому варіанті поділ відбувається у колонці, в другому — на папері або в тонкому шарі сорбенту. У процесі хроматографії речовина, що аналізується, залучається потоком рідини (*елюату*) через колонку, заповнену порошком сорбенту (рис. 5.11). Окремі компоненти затримуються на різних ділянках колонки і можуть бути виділені для

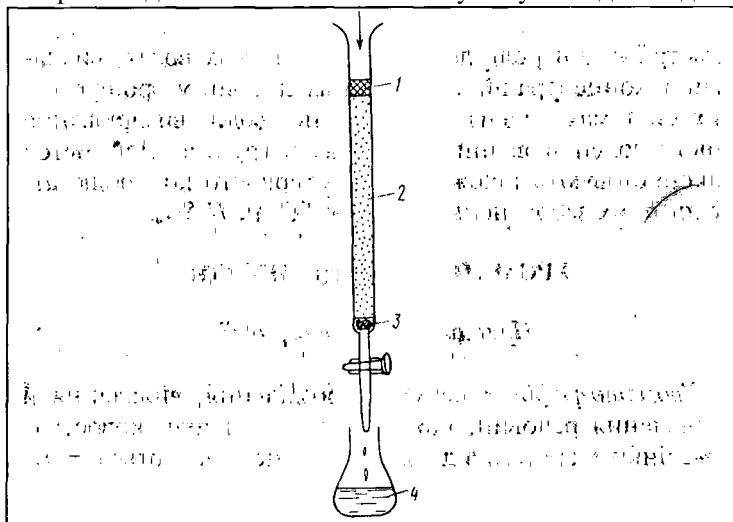


Рис. 5.11. Хроматографічна чарунка: 1 — проба; 2 — накопичувач; 3 — фільтр; 4 — елюат

подальшого хімічного аналізу або за допомогою комп'ютерної системи. У процесі хроматографії рухомою фазою є органічний розчинник, нерухомою — вода, адсорбована на носії. Найпоширенішим носієм є

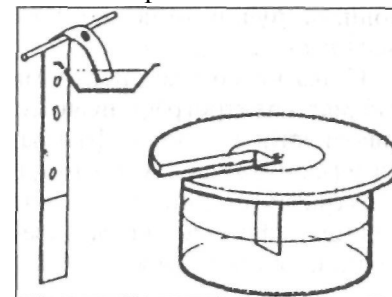


Рис. 5.12. Техніка отримання паперових хроматограм: 1 — висхідна; 2 — низхідна

папір, отже метод цей називають *паперовою хроматографією*. Краплину речовини, що аналізується, наносять на кінець спеціального фільтрувального паперу і висушують, після чого папір опускають в розчинник так, щоб він не торкався нанесеної плями (рис. 5.12). Під впливом капілярних сил розчинник пересувається вздовж паперу, при цьому компоненти суміші розподіляються просторово. Типову хроматограму суміші кількох вуглеводнів наведено на рис. 5.13.

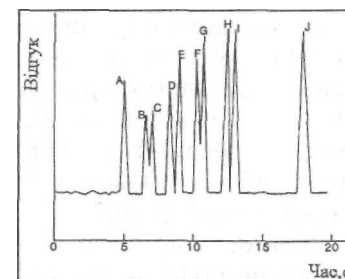


Рис. 5.13. Типова хроматограма суміші кількох вуглеводнів: А — *n*-пентан; В — 4-метилпентан; С — 2,3-диметилбутан; D — 2-метилпент-1-ен; Е — *n*-гексан; F — метилциклопентан; G — 2,4-диметилпентан; H — бензол; I — циклогексан; J — нітронафтален

Одним з перспективних є метод *високоєфективної рідинної хроматографії*, що базується на прискоренні процесу хроматографування під впливом тиску. Для цього рідинну фазу вводять насосом.

*Газова хроматографія* передбачає використання інертного газу як рухомої фази та діатоміту (гідратованого силікагелю) як носія; останній розміщують в спіральних або капілярних колонках. Довжина спіральних колонок досягає 20 м при діаметрі 2÷6 мм, капілярних — до 10 см при діаметрі 0,2÷0,5 мм.

## МАС-СПЕКТРОМЕТРІЯ

Техніка поділу іонізованих молекул і атомів за їх масою, що базується на дії магнітних та електричних полів на пучки іонів, що летять у вакуумі, називається *мас-спектрометрією*.

Є два класи мас-спектрометрів. Перший — *статичний* мас-спектрограф являє собою прилад, здатний поділяти іони у газовій фазі за їх масою або відношенням маси до заряду ( $m/q$ ). Другий — *динамічний* мас-спектрометр здійснює детектування наявності іонів певного відношення  $m/q$  за допомогою резонансної техніки без їх поділу.

### Принцип дії статичного мас-спектрометра

Статичний мас-спектрометр складається з системи підготовки речовини, в якій вона перетворюється в газ; пристрою для іонізації молекул газу; засобу виділення іонів певного знаку з плазми та їх прискорення в даному напрямку; дисперсійного елемента, здатного розділити у просторі або у часі іони певного відношення  $m/q$ ; детектора, здатного кількісно оцінювати іони даного масового числа (сумарної кількості нейтронів і протонів), що проходять крізь вхідну апертуру; вакуумної установки; системи обробки, аналізу і реєстрації інформації.

Відомо: якщо частинка із зарядом  $q$  проходить крізь однорідне поле, то на неї діє сила Лоренца, під впливом якої частинка буде рухатися по криволінійній траєкторії. Баланс сил описується рівнянням:

$$\frac{mV^2}{r} = qVB, \quad (5.12)$$

де  $m$  — маса частинки,  $q$  — її заряд,  $v$  — швидкість руху частинки;  $r$  — радіус кривизни траєкторії;  $B$  — магнітна індукція.

З останнього рівняння можна отримати вираз:

$$\frac{m}{q} = r \frac{B}{V} \quad (5.13)$$

Радіус  $r$  задається конфігурацією магніту. Для спостереження іонів з певним відношенням  $m/q$  слід змінювати або швидкість руху  $V$  частинок, що залежить від прискорюючого потенціалу, або магнітну індукцію  $B$ , яка визначається електричним струмом, що пропускається крізь обмотку магніту. Типові конструкції магнітної системи мас-спектрометра наведено на рис. 5.14.

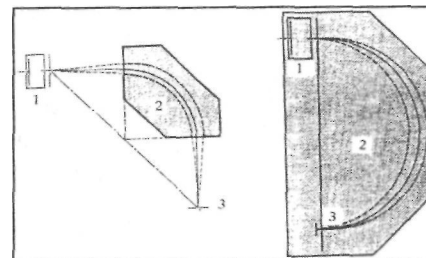


Рис. 5.14. Типові конструкції магнітної системи мас-спектрометра: 1 — джерело іонів; 2 — магнітна система; 3 — щілина

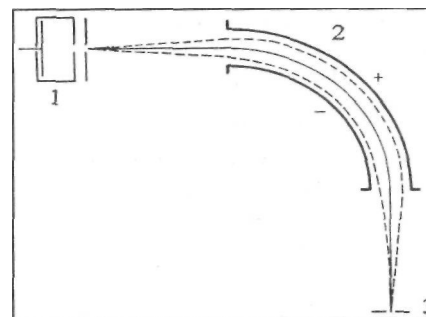


Рис. 5.15. Електричний дискримінатор мас-спектрометра: 1 — джерело іонів; 2 — конденсатор; 3 — щілина

Електричний дискримінатор складається з конденсатора, пластины якого мають криволінійну конфігурацію (рис. 5.15). Розділення заряджених частинок описується рівнянням:

$$\frac{mV^2}{r} = qE, \quad (5.14)$$

де  $E$  — напруженість електричного поля. Звідси:

$$\frac{m}{q} = r \frac{E}{V^2}$$

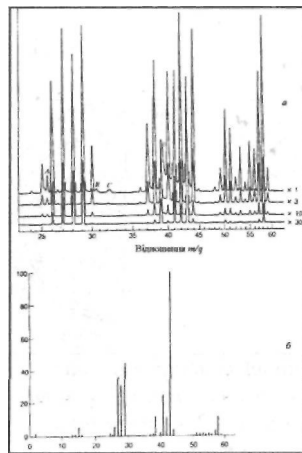


Рис. 5.16. а. Мас-фрагменти η-бутану, зареєстровані з різною чутливістю; б. Мас-спектр n-бутану

Таким чином, іони, що проходять послідовно крізь системи магнітного й електричного відхилення, розділяються у просторі за величинами відношення  $m/q$ . Типовий мас-спектр речовини (n-бутан,  $C_4H_{10}$ ) подано на рис. 5.16.

#### Принцип дії динамічного мас-спектрометра

У мас-спектрометрах цього класу для розділення іонів з різними  $m/g$  використовують різні часи прольоту іонами певної відстані і дію на іони імпульсних або радіочастотних електричних

полів з періодом меншим або рівним часу прольоту іонів крізь аналізатор. Типовим прикладом дина-

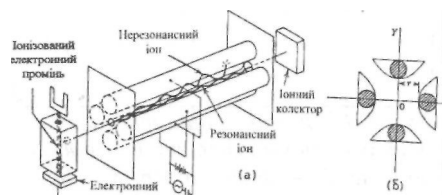


Рис. 5.17. а. Квадрупольний мас-аналізатор; б. Геометричне розташування стержнів у квадруполі

мічного приладу є **квадрупольний мас-аналізатор** (рис. 5.17), який складається з чотирьох паралельних металевих стержнів, що утворюють квадрупольний конденсатор. Між парами цих стержнів прикладені постійна й радіочастотна напруги. Пучок іонів вводиться в вакуумну камеру вздовж осі квадруполя. При фіксованих значеннях частоти  $\omega$  і амплітуди  $U_0$  напруги змінного поля тільки іони з певними значеннями  $m/q$  мають амплітуду коливань, що не перевищує у поперечному напрямку відстані  $2r$  між стержнями. Саме ці іони завдяки початковій швидкості проходять крізь мас-аналізатор і реєструються на його виході.

Рівняння руху цих іонів має вигляд:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \left[ \left( \frac{2q}{mr^2} \right) \cdot (U_{cm} + U_{pc} \cdot \cos \omega t) \right] x = 0. \quad (5.16)$$

Тут  $U_{cm}$  і  $U_{pc}$  - напруги сталої і радіочастотної полів відповідно. Крізь квадруполь проходять іони, що задовольняють умові:

$$m = \frac{aU_{cm}}{\omega^2}, \quad (5.17)$$

де  $a$  - стала приладу,  $\omega$  - частота радіочастотного поля.



## Глава 6. БІОЛОГІЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Спостереження за станом біотичної компоненти біосфери, її реакцією на антропогенні впливи, відхилення від нормального, природного стану на різних рівнях (молекулярному, клітинному, організменному, популяційному й біоценологічному) називається *біологічним моніторингом*.

Біологічний моніторинг пов'язаний з двома основними напрямками — *біоіндикацією* і *біотестуванням*.

### Біоіндикація

#### Типи біоіндикації

*Біоіндикація* — властивість багатьох організмів реагувати на зміни фізичних, хімічних та екологічних характеристик середовища мешкання, що проявляється в особливостях їх росту, розвитку й чисельності.

Виділяють декілька типів біоіндикації: при можливості точно ідентифікувати за зміною на виході зміну на вході кажуть про *специфічну біоіндикацію* — коли зміну реакції можна чітко зіставити з певним фактором середовища; *неспецифічну біоіндикацію* — коли не можна однозначно зіставити дію конкретного фактора зі зміною реакції.

На підставі того, за реакцією якої біосистеми робиться висновок щодо зміни факторів, виділяють *пряму біоіндикацію* — коли висновок про зміну діючих факторів роблять, зважаючи на реакцію системи, на яку цей фактор безпосередньо діє; *опосередковану біоіндикацію* — коли спостереження здійснюють за іншою реакцією, якимось чином пов'язаною з даною систе-

мою, і звідси екстраполюють зміну факторів, що діють на першу систему.

Біоіндикацію здійснюють на об'єктах будь-якого рівня організації — від молекул до екосистем, і, відповідно, кажуть про біоіндикацію на таких рівнях, як *біохімічно-фізіологічному, морфо-анатомічному й етологічному, флористично-фауністичному, ценотичному, екосистемному, ландшафтному рівнях*.

### Біоіндикатори

*Біоіндикатори* — це біосистеми, фізіологічні функції яких так тісно корелюють з факторами навколишнього середовища, що можуть бути використані для оцінки останніх.

Багато організмів чутливі до різних абіотичних і біотичних факторів середовища і можуть існувати лише в певних, часто дуже обмежених межах зміни цих факторів. Отже, спостереження за реакцією біоіндикаторів надаватиме інформацію щодо стану навколишнього середовища. З точки зору екології особливий інтерес становить можливість використання біоіндикаторів для оцінки рівня забруднення довкілля, здійснення постійного моніторингу за його якістю та змінами.

Біологічні системи, що використовувалися як біоіндикатори, різноманітні. В цілому, їх можна класифікувати відповідно до біологічних дисциплін.

*Мікробіологія.* Мікроорганізми швидко реагують на забруднення води й ґрунту; деякі з них вельми чутливі до певних речовин, тоді як інші беруть участь у деградації забруднювачів. Біоіндикатори такого типу можуть реагувати на зміни навколишнього середовища обмеженням або збільшенням різноманітності видів.

*Ботаніка.* Нижчі рослини, лишайники, гриби, багато вищих рослин реагують на зміни стану і забруднення повітря; вони можуть бути використані для визначення меж поширення певних ґрунтових умов (*pH*, родючість, концентрація важких металів).

*Зоологія.* Вивчення окремих видів і суспільств може стати джерелом відомостей про накопичення хімічних

речовин у тілі тварини, для виявлення токсичності речовини в продуктах харчування.

**Клітинна біологія і генетика.** Клітинні і субклітинні компоненти організму можуть бути ефективними біоіндикаторами, адаптованими до певних умов навколишнього середовища.

**Порівняльна фізіологія.** Наявність забруднювачів у навколишньому середовищі зумовлює зміни поведінки тварин; проникнення хімічних речовин в організм супроводжується впливом на функціонування ендокринної, нервової, серцево-судинної та інших систем. Ці функціональні зміни можуть бути дослідженими на морфологічному, біохімічному та фізіологічному рівнях і використаними для аналізу стану навколишнього середовища.

**Гідробіологія.** Характер розподілу та придатність певних видів гідрокарбонатів дає інформацію щодо якості води та наявності в водоймі забруднень.

### **Індикаційні ознаки**

**Індикаційні ознаки** — це біологічні змінні, що характеризують стан окремих особин, групи організмів, популяцій та екосистем. Розглядаються і аналізуються ці ознаки на різних рівнях організації. Реакції на нижчих рівнях організації характеризуються високою чутливістю й специфічністю, тоді як реакції на вищих рівнях найкращі з екологічної точки зору.

Як приклади чутливих біоіндикаторів атмосферного забруднення можна навести епіфітні лишайники (*ліхеноіндикатори*) і хвойні дерева (*дендроіндикатори*).

Біоіндикаційні властивості лишайників базуються на аналізі рівня поселення та, абсолютної поверхні лишайників на стовбурі дерева] видового складу, частоти, з якою вони зустрічаються.

Діагностичними показниками стану хвойних дерев можуть бути середня висота і діаметр дерев, річний приріст паростків, радіальний приріст деревини стовбура, віковий склад і вага хвої, стан генеративних органів, надземна біомаса середнього дерева, вміст забруднень у хвої тощо.

Біоіндикаторами забруднення ґрунтів можуть бути представники ґрунтової фауни. Як приклад — дощові черв'яки, які мають високий адаптивний потенціал до забруднення ґрунту різними токсикантами; їх можна зустріти в біотопах з високим рівнем забруднення. Як індикаційні ознаки можуть бути використані такі біохімічні характеристики: вміст білків, нуклеїнових кислот, сумарна кількість ліпідів, концентрація цитохрому *P-450*. Крім того, аналізу підлягає кількість мікроелементів у тканинах, динаміка накопичення радіоактивних елементів.

Під впливом промислово-побутових стоків відбувається зміна не тільки фізико-хімічних властивостей води, а й характеру фауни й флори водних екосистем. Розглянемо як приклад індикаторів евтрофікації водойм комах-кровососів. У перші роки існування водойми видовий склад комах характеризується наявністю кровососів: гедзів (*Tabanidae*), мокреців (*Ceratopogonidae*), комарів (*Culicidae*). Протягом десяти років у замкнених водоймах накопичується велика кількість органічних забруднювачів. У мулі можна знайти личинки комарів з родини *Tipulidae*, в прибережній зоні — личинки гедзів, мокреців і комарів (*Culex*, *Aedes*, *Mansonia*). Евтрофікація водойми вресіт-ресіт призводить до зміни роду *Mansonia*, *Culiseta*, зменшується кількість видів гедзів; у той же час фауна комах може бути представлена деякими видами з родини *Mucidae*, *Cegatopogonidae*, *Culicidae* (*Culex pipiens*, *Aedes caspius* m.).

Перевагами методів біоіндикації є те, що вони підсумовують біологічно важливі дані щодо навколишнього середовища; здатні реагувати на короткочасні й залпові викиди токсикантів; реагують на швидкість змін, що відбуваються в довкіллі; вказують на місця накопичення забруднювачів та шляхи їх міграції; дають змогу розробляти оцінки шкідливого впливу токсикантів на людину й живу природу на ранніх стадіях; нормувати допустиме навантаження на екосистеми.

До недоліків методів біоіндикації слід віднести те, що вони не дають інформації про об'єктивні, фізико-хімічні особливості стресора, що діє; вони потребують,

як правило, більшої повторності для отримання статистично достовірних результатів.

### Біотестування

**Біотестування** — реєстрація зміни будь-яких біологічних показників (тест-реакцій) під впливом токсичних речовин на вибрані тест-об'єкти як в лабораторних, так і в польових умовах.

**Тест-реакція** — фізіологічна або поведінкова реакція організму на зміну якості середовища.

**Тест-об'єкт** — організм, за ступенем впливу на який судять **про** якість (наприклад, токсичність) середовища.

Біотестування водного середовища здатне забезпечити вирішення таких завдань:

- токсикологічну оцінку промислових і міських стічних вод під час викиду їх у водні об'єкти для виявлення потенційних джерел високого і екстремально високого рівнів забруднення вод;

- контроль в оперативному і безперервному режимах аварійних та інших залпових викидів високотоксичних стічних вод;

- оцінку токсичності стічних вод на різних стадіях формування для проектування локальних очисних споруд;

- контроль токсичності стічних вод, що подаються на біологічні очисні споруди, для запобігання надходженню токсичних для біоценозу активного мулу забруднюючих речовин;

- визначення рівнів безпечного розбавлення стічних вод для гідробіонтів;

- токсикологічну оцінку викидів і дренажних вод сільськогосподарського виробництва;

- оцінку стану природних вод і виявлення акваторій з імпактним рівнем забруднення;

- екологічну експертизу нових технологій і матеріалів, проектних споруд.

### Основні методи біотестування

**Бактерії.** Метод біотестування води за люмінесценцією бактерій (*Benecke harveyi*) передбачає оцінку ін-

тенсивності люмінесценції суспензії клітин бактерій під впливом токсиканта порівняно з інтенсивністю світіння контрольної суспензії (табл. 6.1). Метод рекомендується для контролю стаціонарних і залпових викидів стічних вод.

### 6.1. Типові тест-об'єкти і тест-реакції, що використовуються під час біотестування

Тест-об'єкти	Тест-реакції
<b>Бактерії</b> <i>Bocillus cereus</i> <i>Benecke harveyi</i>	Інтенсивність розмноження, біолюмінесценція, активність окислювальних ферментів, проникність мембрани, механічна міцність
<b>Гриби і актиноміцети</b> <i>Aspergillus niger</i> <i>Streptomyces olivaceus</i>	Ростова реакція
<b>Водорості</b> <i>Scenedesmus quadricuada</i> <i>Sc. acuminates</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Euglena gracilis</i> <i>Dunaliella salina</i> <i>D. viridis</i> <i>Nitella flexilis</i> <i>Phaedactylum tricornutum</i> <i>Cladophora Fracta</i>	Інтенсивність розмноження, рухлива активність, іммобілізація клітин, біоелектрична реакція, фотосинтетична активність клітин, імпеданс суспензії, проникність мембрани, активний транспорт
<b>Найпростіші</b> <i>Tetrahymena pyroformus</i> <i>Spirostomon ambiguum</i> <i>Euplotes sp.</i>	Інтенсивність розмноження, рухлива активність, морфологічні зміни тіла, інтенсивність дихання, активний транспорт
<b>Безхребетні</b> <i>Daphnia magna</i> <i>Hydra attenuata</i> <i>Hirudo medicinalis</i> <i>Unio tumidus</i> <i>Eulimnogammarus vercosus</i> <i>Myzuchopecten yessoensis</i>	Вживаність, інтенсивність дихання і серцебиття, поведінкова реакція
<b>Риби</b> <i>Perca fluviatilis</i> <i>Phoxinus phoxinus</i> <i>Cyprinus carpio</i>	Поведінкова реакція, рухлива активність, інтенсивність дихання і серцебиття, зміна пігментації шкіри

**Водорості.** Відомо, що водорості є ефективними тест-об'єктами під час біотестування водного середовища. Для оцінки токсикантів використовують різноманітні тест-реакції. Одночасна реєстрація кількох тест-реакцій дає можливість одержати повнішу оцінку токсичного впливу забруднювачів. В основі такого підходу лежить так званий *векторний метод біотестування*, що базується на визначенні величини  $r$  і напрямку  $\theta$  вектора  $R$ , який характеризується такими проекціями на осі  $N$ -вимірної системи координат:  $X_1/X_{1c}$ ,  $X_2/X_{2c}$ , ...,  $X_N/X_{Nc}$ , де  $X_1, X_2, \dots, X_N$  і  $X_{1c}, X_{2c}, \dots, X_{Nc}$  — тест-реакції організмів, що перебувають під впливом токсиканта і контрольних організмів відповідно.

У двовимірній системі координат ( $N = 2$ ) величина  $r$  і напрямку  $\theta$  визначаються як:

$$r = \sqrt{(X_1/X_{1c})^2 + (X_2/X_{2c})^2}, \quad (6.1)$$

$$\theta = \arctg [(X_1/X_{1c})/(X_2/X_{2c})]. \quad (6.2)$$

У тривимірній системі координат ( $N = 3$ ), величина  $r$  і напрямки ( $\theta_1$  і  $\theta_2$ ) визначаються як:

$$r = \sqrt{(X_1/X_{1c})^2 + (X_2/X_{2c})^2 + (X_3/X_{3c})^2} \quad (6.3)$$

$$\theta_1 = \arccos [X_1/X_{1c}/r], \quad (6.4)$$

$$\theta_2 = \arctg [(X_3/X_{3c})/(X_2/X_{2c})]. \quad (6.5)$$

Величина  $r$  і напрямки ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$  і  $\theta_3$ ) вектора  $R$  в чотиривимірній системі координат ( $N = 4$ ) визначаються за допомогою таких рівнянь:

$$r = \sqrt{(X_1/X_{1c})^2 + (X_2/X_{2c})^2 + (X_3/X_{3c})^2 + (X_4/X_{4c})^2} \quad (6.6)$$

$$X_1/X_{1c} = r \cos \theta_1, \quad (6.7)$$

$$X_2/X_{2c} = r \sin \theta_1 \cos \theta_2, \quad (6.8)$$

$$X_3/X_{3c} = r \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3, \quad (6.9)$$

$$X_4/X_{4c} = r \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3. \quad (6.10)$$

Може бути також використана  $N$ -вимірна система координат, але в цій ситуації графічне вираження вектора  $R$  неможливе; величина і напрямку його наводяться в таблиці.

Розглянемо як приклад застосування векторного методу використання параметрів фоторуху як тест-

реакцій зеленої водорості *Dunaliella viridis* Teod. — тест-об'єкта під час біотестування водного середовища. Спостереження здійснювали за такими тест-реакціями як поступальна  $V$  і обертальна  $\eta$  швидкості, фототаксис  $F$  і рухомість  $N/N_0$  (де  $N$  і  $N_0$  — кількість рухомих і нерухомих клітин).

На рис. 6.1 наведено залежність величини  $r$  і напрямку ( $\theta_1$  і  $\theta_2$ ) вектора  $R$  від наявності важких металів у тривимірній системі координат (тобто при одночасному вимірюванні швидкості руху, фототаксису і рухливості клітин). Видно, що при однаковій концентрації дію різних металів цілком можна відрізнити.

**Риби.** Забруднення водойм безпосередньо впливає на іхтіофауну. На стан і поведінку риб впливають суспендовані у воді речовини,  $pH$  середовища, хімічні сполуки, важкі метали, пестициди, поверхнево-активні речовини. Вплив токсикантів на риб залежить від тривалості дії, типу токсиканта, показників якості води, видів риб та стадій їх життєвого циклу.

Основні методи біотестування з рибами як тест-об'єктами базуються на реєстрації таких тест-реакцій як поведінка, рухова активність, інтенсивність серцебиття та дихання, зміна рівня пігментації, порушення активності ферментів тощо. Розглянемо конкретні методи біотестування.

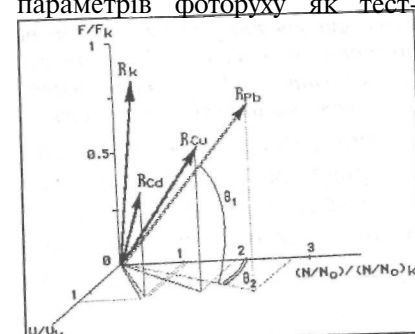


Рис. 6.1. Величина і напрямку вектора  $R$  в тривимірній системі координат залежно від типу токсиканта

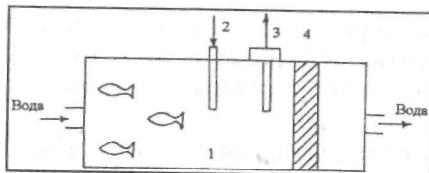


Рис. 6.2. Схема біосигналізатора, який використовується для біотестування стічних вод: 1 — акваріум; 2 — електроди; 3 — фотоприймач; 4 — система подачі чистої води

ду риб з «житлової» зони заважає електричне поле, що створюється електродами. Після підвищення токсичності води риби залишають цю зону, що фіксується фотоприймачами. Метод був застосований для контролю

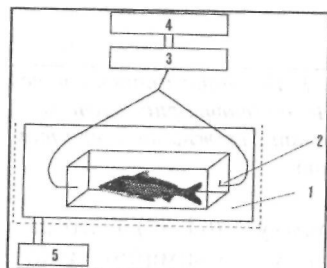


Рис. 6.3. Схема установки для біотестування стічної води відповідно до кардіо-респіраторних реакцій риби: 1 — контейнер; 2 — електроди; 3 — підсилювач; 4 — система реєстрації; 5 — термостат

вод, що містять активний хлор, аміак, мідь, залізо, спирти, альдегіди, нафтоли, поверхнево-активні речовини, аміно- та нітросполуки.

Інший метод (рис. 6.3) передбачає реєстрацію електрокардіограми (ЕКГ) та електропневмограми (ЕПГ) риб, вміщених у контейнер з проточною водою, обладнаний електродами. Визначення рівня токсичності води полягає в порівняльному аналізі середніх значень ЕКГ і ЕПГ для груп риб у розчинах з

токсикантом та в контрольній воді.

Подальші перспективи біотестування водних середовищ можна бачити в таких напрямках:

- розробка нових критеріїв оцінки методів біотестування;
- обґрунтування вибору тест-об'єктів і тест-реакцій на вплив особливо небезпечних хімічних сполук для розробки конкретних методів біотестування;
- випробування методів та створення приладів-біосигналізаторів токсичності.

На рис. 6.2 наведено принципи дії біосигналізатора, в якому використовується поведінкова реакція риб. При відсутності токсикантів риби тримаються проти течії; мимовільному вихо-

## ВИСНОВКИ

Населення земної кулі дедалі зростає, що ставить нашу біосферу перед цілим рядом найсерйозніших проблем. Процеси індустріалізації та урбанізації супроводжуються появою різноманітних відходів, інтенсифікацією використання паливних запасів і, врешті-решт, забрудненням навколишнього середовища. Природні й антропогенні порушення екологічної рівноваги призводять до економічних збитків або спричиняють небезпеку для здоров'я і життя мешканців земної кулі.

Розв'язання проблем навколишнього середовища слід починати з екологічної освіти, зокрема з підготовки досвідчених кадрів, здатних грамотно ставити проблеми, організувати спостереження й аналіз причин забруднення, розгляд і порівняння альтернативних заходів, вибір оптимального варіанта, прийняття необхідного рішення.

Вкрай необхідною є розробка превентивних технологій і застосування сучасних методів контролю навколишнього середовища; пошуки нетрадиційних природних джерел енергії — геотермальної, сонячної, вітрової, океанської, а також отриманих завдяки принципово новим технічним рішенням, таких як керований термоядерний синтез, одержання метану з біомаси тощо.

Дуже важливо використовувати поняття екологічної етики, а також враховувати соціальні, політичні, юридичні й релігійні фактори щодо розв'язання екологічних проблем.

Запобігти забрудненню навколишнього середовища можна за заборони і мінімізації екологічних відходів, стимуляції людської активності; все це спонукає людство до неординарних дій та заходів. Тут доцільно нагадати висновки, яких дійшов так званий «Римський

клуб» — неформальна організація вчених, гуманістів, промисловців різних країн:

О якщо існуючі сьогодні тенденції зростання населення світу, індустріалізації, забруднення навколишнього середовища, виробництва продуктів харчування та виснаження ресурсів збережуться незмінними, то вже протягом наступного століття людство дійде межі зростання;

О є можливість змінити ці тенденції зростання і встановити екологічну та економічну стабільність, яку можна підтримувати в далекому майбутньому;

О якщо люди всього світу вирішать боротися не за перший, а за другий варіант розвитку, то чим швидче вони візьмуться за його впровадження, тим більше шансів на успіх матимуть.

Реалізація такої екологічної програми не під силу одній людині; для виконання цього грандіозного завдання потрібна участь різних громадських організацій, засобів масової інформації, державних закладів не тільки України, але й інших країн. Свого часу сенатор Фулбрайт писав щодо створення цивілізованої, раціональної й гуманної атмосфери в міжнародних відносинах: «Я вірив у таку можливість, починаючи роботу. Вірю й дотепер». Цю віру щодо можливості збереження довколишнього нас світу поділяємо й ми.

## ДОДАТОК

### Сталі

Символ	Назва	Величина і одиниці
$c$	Швидкість світла у вакуумі	$2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
$F$	Число Фарадея	$9,649 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
$g$	Прискорення вільного падіння	$9,780 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$
$h$	Стала Планка	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
$hc$	Стала Планка · швидкість світла	$1,986 \cdot 10^{-25} \text{ Дж} \cdot \text{м}$
$k$	Стала Больцмана	$1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
$kT$	Стала Больцмана · температура	$0,0235 \text{ еВ при } 0^\circ \text{C}$ $0,0253 \text{ еВ при } 20^\circ \text{C}$
$N$	Число Авогадро	$6,0220 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
$Nhc$	Число Авогадро · стала Планка · швидкість світла	$0,1196 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{м}$ $119600 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{нм}$
$R=Nk$	Універсальна газова стала	$8,3143 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
$RT$	Універсальна газова стала · температура	$2,271 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при $0^\circ \text{C}$ $2,437 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$ при $20^\circ \text{C}$
$RT/F$		$25,3 \text{ мВ при } 20^\circ \text{C}$
$2,303RT/F$		$58,2 \text{ мВ при } 20^\circ \text{C}$
$\delta$	Стала Стефана-Больцмана	$5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$

### Розмірності та одиниці вимірювання фізичних величин у різних системах одиниць

Величина і одиниця в СІ	Зв'язок з іншими одиницями	Зворотні перетворення
Довжина, м	$10^2 \text{ см}$	$1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$
	$10^6 \text{ мкм}$	$1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$
	$10^9 \text{ нм}$	$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$
	$10^{10} \text{ Å}$	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$
Маса, кг	$10^3 \text{ г}$	$1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$
Густина, $\text{кг/м}^3$	$10^{-3} \text{ г/см}^3$	$1 \text{ г/см}^3 = 10^3 \text{ кг/м}^3$
Об'єм, $\text{м}^3$	$10^6 \text{ см}^3$	$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$
	$10^3 \text{ дм}^3$	$1 \text{ дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3$
Сила, Н	$10^5 \text{ дін}$	$1 \text{ діна} = 10^{-5} \text{ Н}$
Робота, Дж	$10^7 \text{ ерг}$	$1 \text{ ерг} = 10^{-7} \text{ Дж} = 2,390 \cdot 10^{-8} \text{ кал}$
	$0,2388 \text{ кал}$	$1 \text{ кал} = 4,187 \text{ Дж} = 4,187 \cdot 10^7 \text{ ерг}$
	$0,6242 \cdot 10^{19} \text{ еВ}$	$1 \text{ еВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ ерг}$
Тиск, Па	$10^{-5} \text{ бар}$	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,987 \text{ атм} = 750 \text{ мм рт. ст.}$
	$0,987 \cdot 10^{-5} \text{ атм}$	$1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$
	$7,5 \cdot 10^{-3} \text{ тор}$	$1 \text{ тор} = 133 \text{ Па} = 0,00133 \text{ бар} = 1 \text{ мм рт. ст.} = 1330 \text{ дін/см}^2$
Кут, градус	$0,01745 \text{ рад}$	$57,30^\circ$
В'язкість, $\text{Па} \cdot \text{с}$	$10 \text{ пуаз}$	$1 \text{ пуаз} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Дальтон	$1,660 \cdot 10^{-24} \text{ г}$	$1/12 \text{ маси атома вуглецю}$

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Алексеев И.Р., Коньчев А.А., Панченко Н.А.* Экстремальные факторы и биообъекты. — К.: Наукова думка, 1989. — 150 с.
- Беккер А.А., Агаев Т.Б.* Охрана и контроль загрязнения природной среды. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 286 с.
- Беттен Л.* Погода в нашей жизни. — М.: Мир, 1985. — 223 с.
- Бигон М., Харриер Дж., Таунсенд К.* Экология. Особи, популяции и сообщества. — М.: Мир, 1989. — Т. 1. - 667 с; Т. 2. - 477 с.
- Биологическое действие электромагнитных полей.* — М.: Наука, 1984. — 326 с.
- Браславский А.П., Кумарина М.Н., Смирнова М.Е.* Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 250 с.
- Бронштейн Д.Л., Александров Н.Н.* Современные средства измерения загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 327 с.
- Бурдин КС.* Основы биологического мониторинга. — Изд-во МГУ, 1985. — 156 с.
- Владимиров Ю.А., Рощупкин Д.И., Потапенко А.Я., Девев А.И.* Биофизика. — М.: Медицина, 1983. — 272 с.
- Вронский В.Л.* Прикладная экология. — Ростов-на-Дону: Феникс, 1996. — 509 с.
- Городецкий О.А., Гуральник И.И., Ларин В.В.* Метеорология, методы и технические средства наблюдения. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 336 с.
- Григорьев А.А.* Экологические уроки исторического прошлого и современности. — Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1991. — 246 с.
- Деградація ґрунтів та шляхи підвищення їх родючості.* — Луцьк: Надстир'я, 1998. — 278 с.
- Дорохова Е.Н., Прохорова Т.В.* Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа. — М.: Высшая школа, 1991. — 256 с.
- Жигалин А.Д.* Техногенные физические поля// Природа, 1993. — № 2. — С. 15-23.
- Заславский Марк.* Эрозиоведение. — Москва: Высшая школа, 1983. — 320 с.
- Земельные и водные ресурсы: противоэрозионная защита и регулирование русел.* — Москва: Изд-во МГУ, 1990. — 172 с.
- Иванов В.И.* Курс дозиметрии. — М.: Энергоиздат, 1988. — 399 с.
- Копанев В.И., Шакула А.В.* Влияние гипогеомагнитного поля на биологические объекты. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. — 72 с.
- Костюк П.Г., Гродзинский Д.М., Зима В.Л., Магура И.С., Сидорик Е.П., Шуба М.Ф.* Биофизика/ Под общ. ред. П.Г. Костюка. — Киев, Вища шк. Головное изд-во, 1988. — 504 с.
- Лекции по биофизике/ Под ред. П.О. Макарова.* — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1968. — 272 с.
- Михайленко М.М.* Основы агрометеорологии. — К.: Вища школа, 1982. — 191 с.
- Одум Ю.* Экология: В 2-х т. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с; Т. 2. — 376 с.
- Павловский В.Б., Василенко И.Д., Урсулов В.Ф.* Агрометеорология. — К.: Вища школа, 1994. — 174 с.
- Посудин Ю.И.* Лазерная фотобиология. — К.: Вища шк., 1989. — 246 с.
- Посудін Ю.І.* Біофізика риб. — К.: Вид-во НАУ, 1996. — 32 с.
- Посудін Ю.І.* Біофізика. — К.: Урожай, 1995. — 224 с.
- Посудін Ю.І.* Спектроскопічний моніторинг агросфери. — К.: Урожай, 1998. — 127 с.
- Рамад Ф.* Основы прикладной экологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 543 с.
- Рубин А.Б.* Биофизика, в 2-х кн.: Учеб. для биол. спец. вузов. Кн. 1. Теоретическая биофизика. — М.: Высш. шк., 1987. — 319 с.

*Сравнительная физиология животных.* — М.: Мир, 1977.  
- Т. 1. - 608 с; Т. 2. - 571 с; Т. 3. - 653 с.

*Стекольников И.С.* Изучение молнии и грозозащиты.  
- Изд-во АН СССР. - М.: 1955. - 159 с.

*Сытник К.М., Брайон А.В., Гордецкий А.Р., Брайон А.П.*  
Словарь-справочник по экологии. — К.: Наукова думка, 1994. — 665 с.

*Хргиан Ф.Х.* Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 647 с.

*Хэнке Р.Дж., Аси Крофт Дж.Л.* Прикладная физика почв. Влажность и температура почв. — Л.: Гидрометеиздат, 1995. — 151 с.

*Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1976. - 367 с.

*Эккерт Р., Рэнделл Д., Огастин Дж.* Физиология животных. - М.: Мир, 1991. - Т. 1. - 424 с; Т. 2. - 343 с.

*Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение.* — М.: Наука, 1984. — 375 с.

*Электропередачи сверхвысокого напряжения и экология:* Сб. науч. тр./ ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. — М.: 1986. — 203 с.

*Akoev G.N., Alekseev N.P., Krylov B.V.* Mechanoreceptors. Their Functional Organization. Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York/ London / Paris / Tokyo, 1988. - 197 p.

*Alexander R.M.* Animal Mechanics. University of Washington Press, Seattle, 1968. — 346 p.

*Barbieri M.* Physics a biophysics. Edizioni Monduzzi, Bologna, 1972. - 508 p.

*Berg A.* Application of Remote Sensing to Agricultural Production Forecasting. A.A.Balkema, Rotterdam, 1981. - 266 p.

*Boeker E., Gmndelle R.* Environmental Physics. John Wiley and Sons. New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore, 1995. — 448 p.

*Brown B.H., Smallwood R.H., Barber D.C., Lawford P.V., Hose D.R.* Medical Physics and Biomedicasl Engineering. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999. - 736 p.

*Bullock T.H., Heiligenberg W.F.* Electoreception. Melbourne: Krieger Publishing Company, 1986. — 722 p.

*Clevers J.G.P.W.* Application of Remote Sensing to Agriculture Field Trials, Agricultural University Wageningen, The Netherlands, 1986. — 227 p.

*Crane E.* Bees and beekeeping. Science, practice and world resources. Comstock Publishing Associates, Cornell University Press, Ithaca, NY., 1990. — 614 p.

*Cunningham J.G.* Textbook of Veterinary Phisiology. W.B. Saunders Company, Philadelphia / London / Toronto / Montreal / Sydney / Tokyo, 1992. — 656 p.

*Curran P.J., Foody G.M., Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Fedchenko P.P.* Remote sensing of soils and vegetation in the USSR. Taylor and Francis, London / New York / Philadelphia, 1990. - 203 p.

*Curtis S.E.* Environment management in animal agriculture. The Iowa State University Press, 1883. — 409 p.

*Doppler* Ultrasound (Physics, Instrumentation, and Clinical Applications). A Wiley Medical Publication, 1989. — 297 p.

*Duncan G.* Physics for Biologists, Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne, 1975. - 200 p.

*Farm Animals and the Environment /Phillips C. and Piggins D., eds.* CAB International, 1992. — 430 p.

*Frandsen R.D., Spurgeon T.L.* Anatomy and Physiology of Farm Animals, Lea and Febiger, Philadelphia, 1992. - 572 p.

*Gausman H. W.* Plant Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared Light. Gratuante Studies Texas Tech Universisity, N29, 1985. — 78 p.

*Geddes L.A.* The Direct and Indirect Measurement of Blood Pressure. Year Book Medical Publishers, Inc., Chicago, 1970. - 196 p.

*Goodman L.J., Fisher R.C.* The Behaviour and Physiology of Bee. G.A.B. International, 1991. — 362 p.

*Gray J.* Animal Locomotion. W.W. Norton and Company Inc. NY., 1968. - 479 p.

*Hallet R.F., Sanson R.H., Speight P.A.* Physics for the Biological Sciences. A Topical Approach to Biophysical



Concepts. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982. - 320 p.

Henry J.G., Heike G.W. Environmental Science and Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1996. — 778 p.

Inhaber H. Physics of the Environment. Ann Arbor Science, 1978. - 225 p.

Laser Monitoring of the Atmosphere / E.D.Hinkley, ed. Springer-Verlag, Berlin, 1976. - 380 p.

Levis B., Bioacoustics. A comparative approach. Acad. Press, 1983. — 493 p.

Living in the Environment. An Introduction to Environmental Science. Fifth Edition. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1988. — 603 p.

McCartney E.J. Absorption and Emission by Atmospheric Gases. John Wiley and Sons, New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore, 1983. — 320 p.

Measures R.M. Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. John Wiley and Sons, New York / Chichester / Brisbane / Toronto / Singapore, 1984. - 510 p.

Optical Remote Sensing of Air Pollution, P. Camagni and S. Sandroni, Eds. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1984. - 350 p.

Posudin Yu.I. Lasers in Agriculture. Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire, 1998. - 188 p.

Rees W.G. Physical Principles of Remote Sensing. New York / Port Chester / Melbourne / Sydney: Cambridge University Press, 1990. — 261 p.

Remote Sensing With Special Reference to Agriculture and Forestry, National Academy of Sciences, Washington, 1970. - 424 p.

Remote Sensing: The Quantitative Approach, McGraw-Hill Book Company, New York, 1978. — 396 p.

Rose A.H. Thermobiology. Academic Press, London, NY., 1967. - 653 p.

Schalm O.W. Veterinary Hematology. McGraw-Hill Book Company, inc. NY., Toronto, London. 1960. — P. 181-547.

Schmidt—Nielsen K. Animal Physiology. Adaptation and Environment. Cambridge University Press, 1975. — 699 p.

Smythe P.H. Animal Vision. What Animals See. Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA.

Smythe R.H. Vision in the Animal World. New York: Saint Martin's Press, LLC, 1975. — 175 p.

Stebbins W.C. The Acoustic Sense of Animals, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1983. — 168 p.

Sybesma C Biophysics, an introduction. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1989. — 478 p.

Taverne M.A.M. and Willemse A.H. Diagnostic Ultrasound and Animal Reproduction. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/ Boston/ London, 1989. — 123 p.

Tempest W. Infrasound and Low Frequency Vibration, Academic Press, London, N.Y., San Francisco, 1976. - 364 p.

Williams A.R. Ultrasound: Biological Effects & Potential Hazards. San Diego: Academic Press, Inc., 1983.

Wiltshko R., Wiltshko W. Magnetic Orientation in Animals. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1995. - 336 p.

Yost W.A., Nielsen D.W. Fundamentals of Hearing. An Introduction. 2nd ed. Fort Worth: Hartcourt College Publishers, 1985. — 256 p.

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3	Фізичні процеси, що супроводжують поширення звуку	56
Глава 1. БУДОВА І ФУНКЦІЇ БІОСФЕРИ	6	у навколишньому середовищі	58
БІОСФЕРА ТА ЇЇ ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ	6	Поширення звуків у водному середовищі	58
Основні визначення	6	Акустична комунікація тварин	61
Атмосфера	9	АКУСТОРЕЦЕПЦІЯ	61
Гідросфера	10	Акусторецепція у ссавців	61
Літосфера	11	Акусторецепція у птиці	65
ПРИРОДА І МАСШТАБ ПРОБЛЕМ		Акусторецепція у риб	66
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	11	Акусторецепція у комах	67
Природні порушення екологічної рівноваги	11	Шум і вібрації	68
Вплив збільшення чисельності населення на		Характеристики шуму	68
навколишнє середовище	12	Вимірювання рівнів шуму	70
Вплив урбанізації на навколишнє середовище	13	Вплив шуму на живі організми	70
Вплив індустріалізації на навколишнє середовище	14	Вібрації	71
Вплив розвитку енергетики на навколишнє середовище	16	Вплив вібрацій на живі організми	72
Техногенні порушення екологічної рівноваги	16	ВОЛОГІСТЬ	73
Експлуатація військової техніки	17	Вологість повітря	73
Освоєння космосу	18	Методи вимірювання вологості повітря	75
Глава 2. АБІОТИЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА	21	Вологість ґрунту	78
МЕХАНІЧНІ ФАКТОРИ	21	Вимірювання вологості ґрунту	79
Тиск	21	Вплив вологості на живі організми	79
Вимірювання тиску	22	ТЕМПЕРАТУРА	81
Вплив тиску на живі організми	23	Теплоємність та питома теплоємність	82
Тиск крові в живих організмах	25	Тепловий обмін	82
Фізичні принципи захворювань кровоносних судин	27	Вимірювання температури	86
Осмотичний тиск у рослинній клітині	28	Температура повітря	88
Рух повітря	30	Температура ґрунту	89
Вимірювання параметрів вітру	33	Температура водойм	93
Вплив вітру на живі організми	34	Температурні стресові ситуації	94
Дія зовнішніх сил на частинки	35	Вплив температури на тварин	95
Дія гравітаційної сили на живі організми	37	Термостатична регуляція температури тіла	99
Механорецепція	38	ТЕРМОРЕЦЕПЦІЯ	101
Механорецептори шкіри	39	Механізми терморецепції	101
Вестибулорецепція	41	Термотаксис	103
Інтерорецепція	42	ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ ПОЛЯ	103
Механорецепція у риб	44	Електричні поля природного походження	103
Механорецепція у бджіл	45	Вимірювання електричних полів	105
АКУСТИЧНІ ФАКТОРИ	47	Вплив електричних полів на живі організми	105
Пружні коливання та хвилі	47	ЕЛЕКТРОРЕЦЕПЦІЯ	109
Характеристики звукових коливань	49	Магнітне поле Землі	111
Суб'єктивні характеристики звукових хвиль	51	Методи вимірювання магнітних полів	111
Характеристики ультразвукових коливань	52	Вплив магнітних полів на живі організми	112
Вплив ультразвуку на біологічні об'єкти	52	МАГНІТОРЕЦЕПЦІЯ	114
Вплив інфразвуку на живі організми	53	СОНЯЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ	114
Біоакустика	54	Параметри сонячного випромінювання	114
Утворення звуків тваринами	54	Баланс сонячного випромінювання	117
		Методи вимірювання сонячного випромінювання	119
		Параметри сонячного випромінювання	120

Енергетичні величини	120
Світлові величини	122
Парниковий ефект	123
Озонова діра	124
Сонячна активність	127
Фотосенсибілізація	12 8
Основні механізми фотосенсибілізації	128
Основні типи фотосенсибілізації	129
Фоточутливість, пов'язана з порушенням синтезу пігментів	130
Гепатогенна фоточутливість	130
Фотодеградація продуктів	131
ФОТОРЕЦЕПЦІЯ	133
Зорові аналізатори живих істот	133
Зоровий аналізатор ссавців	133
Зоровий аналізатор птахів	135
Зоровий аналізатор риб	138
Фоторецепція у комах	139
Фоторецепція у мікроорганізмів	140
Механізми фоторецепції	142
Заломлююча здатність ока	142
Механізми зору	143
ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ	144
Закон радіоактивного розпаду	145
Характеристики іонізуючих випромінювань	146
Вимірювання іонізуючих випромінювань	149
Радіоактивні забруднення	151
Вплив іонізуючих випромінювань на живі організми	152
Радіоактивні відходи	152
Вплив радіоактивних відходів на живі організми	153
Екологічні наслідки випробувань ядерної зброї	154
ГІДРОГРАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА	158
Водні ресурси	15 8
Фізичні характеристики води	158
Густина води	158
В'язкість води	159
Теплофізичні характеристики води	159
Оптичні властивості води	160
Забруднення водного середовища	161
Механічні забруднення	161
Теплове забруднення	161
Евтрофікація водойм	162
Стічні води	162
Контроль якості води	164
Стандарти якості води	164
Дезінфекція питної води	166
ЕДАФІЧНІ ФАКТОРИ СЕРЕДОВИЩА	169
Основні характеристики ґрунту	169

Склад ґрунту	169
Хімічні властивості ґрунту	170
Фізичні властивості ґрунту	171
Забруднення ґрунту	172
Хімічні забруднення ґрунту	172
Тверді відходи	172
Ерозія ґрунтів	173
ХІМІЧНІ ФАКТОРИ	176
Хімічні забруднення атмосфери	176
Основні забруднювачі повітря	176
Кислотні дощі	177
Смог	178
Забруднення навколишнього середовища нафтою і нафтопродуктами	179
Склад і властивості нафти	179
Шляхи забруднення навколишнього середовища нафтою і нафтопродуктами	180
Вплив нафти на живі організми	181
Методи контролю нафтової плівки	182
Транспортні засоби і навколишнє середовище	184
Контроль якості повітря	186
Стандарти якості навколишнього повітря	186
Глава 3. БІОТИЧНІ ФАКТОРИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІЗМІВ	187
Класифікація біотичних факторів	187
МЕТОДИ ОЦІНКИ ВЗАЄМОДІЇ ОРГАНІЗМІВ	191
Внутрішньовидова конкуренція	191
ВПЛИВ ОРГАНІЗМІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ	197
Повітряна мікробіологія	197
Водна мікробіологія	198
Ґрунтова мікробіологія	199
Вплив мікроорганізмів на навколишнє середовище	199
Патогенні мікроорганізми	199
Атмосферні аерозолі біологічного походження	200
Біомедичні відходи	201
Глава 4. СПЕКТРОСКОПІЧНИЙ МОНІТОРИНГ БІОСФЕРИ	202
ОСНОВИ СПЕКТРОСКОПІЇ	202
СПЕКТРИ АТОМІВ І МОЛЕКУЛ	202
Спектри атомів	202
Спектри молекул	203
Процеси дезактивації	205
Основні спектроскопічні терміни	206
СПЕКТРОСКОПІЧНІ МЕТОДИ	210
СПЕКТРАЛЬНІ ПРИЛАДИ	218
Класифікація спектральних приладів	218
Принципи дії спектральних приладів	221

ЛАЗЕР ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ	221
Принцип дії лазера	221
Стимульоване випромінювання	222
Інверсія населеності	222
Будова лазера	222
Основні параметри лазерного випромінювання	224
СПЕКТРОСКОПІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РОСЛИН І РОСЛИННИХ ПОКРИВІВ	224
Спектроскопія відбивання	225
Механізми відбивання	225
Методи спектроскопії відбивання	225
Відбивальні вегетаційні індекси	226
Відбивальні властивості окремого листка	227
Вплив різних факторів на відбивання листка	228
Відбивальні властивості рослинного покриву	230
Вплив різних факторів на відбивання рослинного покриву	230
Флуоресцентна спектроскопія	231
Механізм флуоресценції	231
Методи дослідження флуоресценції окремого листка	231
Флуоресцентні індекси	235
Флуоресцентні властивості окремого листка	235
Вплив різних факторів на флуоресцентні властивості окремого листка	236
Флуоресцентні властивості рослинних покривів	238
Вплив різних факторів на флуоресценцію рослинного покриву	239
ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ БІОСФЕРИ	239
Дистанційне зондування атмосфери	240
Взаємодія оптичного випромінювання з атмосферою	240
Поглинання атмосфери	241
Розсіювання атмосфери	242
Розбіжність лазерного випромінювання	242
Лазерне дистанційне зондування	244
Лідар на основі реєстрації зворотного розсіювання	245
Лідар на основі реєстрації диференційного поглинання	247
Допплерівський лідар	248
Лідар на основі реєстрації флуоресценції	249
Лідар на основі реєстрації комбінаційного розсіювання	250
Застосування лідарів при дистанційному зондуванні атмосфери	252
ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТУ	254
Відбивання оптичного випромінювання від природних поверхонь	254
Нерівність ґрунтової поверхні	254
Вплив хімічних властивостей ґрунту на його відбивання	255

Вплив фізичних властивостей ґрунту на його відбивання	257
Дистанційне зондування ґрунту	257
ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ	258
Відбивальні характеристики водних середовищ	258
Флуоресцентні характеристики водних середовищ	259
Дистанційне зондування земної поверхні за допомогою супутників	260
Вегетаційні індекси	262
Глава 5. ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ, ХРОМАТОГРАФІЧНІ ТА МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	264
ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ	264
Принципи дії електрохімічних методів	264
Потенціометрія	266
Вольтамперометрія	267
Полярограма та її характеристики	268
Метод вольтамперометрії	269
Метод полярографії	269
Практичне застосування вольтамперометрії	270
Кулонометрія	270
Техніка кулонометрії	271
Кондуктометрія	271
Процедура вимірювань	273
ХРОМАТОГРАФІЧНІ МЕТОДИ	273
Принципи хроматографії	273
Методи хроматографії	274
МАС-СПЕКТРОМЕТРІЯ	276
Принцип дії статичного мас-спектрометра	276
Принцип дії динамічного мас-спектрометра	278
Глава 6. БІОЛОГІЧНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	280
Біоіндикація	280
Типи біоіндикації	280
Біоіндикатори	281
Індикаційні ознаки	282
Біотестування	284
Основні методи біотестування	284
Висновки	289
Додаток	291
Список рекомендованої літератури	292

*Наукове видання*

Посудін Юрій Іванович

**ФІЗИКА І БІОФІЗИКА  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Коректор Л. Захарченко  
Комп'ютерна верстка І. Сенкевича

Підписано до друку 21.01.2000 р. Формат 84x108/32.  
Гарнітура Тайме. Папір офсетний. Друк офсет.  
Авт. арк. 15,5. Обл.-вид. арк. 16,2. Наклад 500 прим.  
Замовлення № о-27

Книжково-журнальне видавництво «СВІТ».  
Державний реєстраційний № 5313 від 25.11.1998 р.

ВАТ Білоцерківська книжкова фабрика,  
09117, Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4